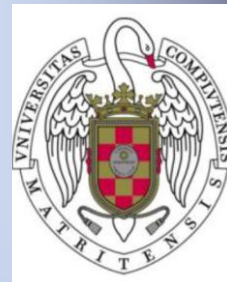


**MÁSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA**

Trabajo Final



**UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE DE
MADRID**

**Facultad de
Geografía e Historia**



**MODELO GEOGRÁFICO PARA LA ESTIMACIÓN
DEL POTENCIAL FOTOVOLTAICO EN TEJADOS.
CASO DE ESTUDIO: MIRAFLORES DE LA SIERRA.**

Autora: Ana María Martín Ávila
Tutores: Javier Domínguez Bravo
Javier Gutiérrez Puebla

Febrero 2014

RECONOCIMIENTO

Mi agradecimiento al CIEMAT y en especial Javier Domínguez, Nuria Martín, Luis Zarzalejo y Vicente Roque por su atención, apoyo técnico y tiempo dedicado para llevar a cabo este trabajo. También quiero agradecer los profesores de la Universidad Complutense de Madrid y a Julio Amador su asesoramiento, a Luís Izquierdo de M&I Geospace los medios prestados y al Ayuntamiento de Miraflores de la Sierra.

El presente TFM se enmarca dentro del proyecto **gSolarRoof** *“Characterization and implementation of a GIS for improvement the integration of PV panels in urban areas”*, desarrollado por el **CIEMAT** en colaboración con el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la **Universidad Politécnica de Madrid UPM**. El proyecto está dirigido por el Dr. Javier Domínguez Bravo, responsable del grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables del CIEMAT. El principal objetivo es *“elaborar un modelo geográfico para la evaluación del aprovechamiento potencial de cubiertas y espacios urbanos con energía solar fotovoltaica”*. El coordinador de las actividades por parte de la UPM es el profesor Julio Amador Guerra.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS	5
3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	6
3.1. Irradiación solar	6
3.2. Posición del Sol	7
3.3. Tecnología fotovoltaica	7
3.4. Tipos de células fotovoltaicas	8
3.5. Instalaciones fotovoltaicas en edificaciones	11
3.5.1. Tipos de tejados	11
3.5.2. Módulos fotovoltaicos sobre tejados	12
3.6. Potencia instalada	13
3.7. Energía	14
4. LIDAR	14
4.1. Tecnología LIDAR	14
4.2. Datos LIDAR	16
5. ANTECEDENTES	17
6. FUENTES DE INFORMACIÓN	19
6.1. Datos LIDAR	19
6.2. Ortofotografías	20
6.3. Catastro	21
6.4. Radiación solar	21
6.4.1. ADRASE	21
6.4.2. PVGIS	22
6.5. Datos de posición del Sol	23
6.6. Edificios singulares	25
7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	25
7.1. Situación	25
7.2. Clima	26
7.3. Estructura urbana	26
8. METODOLOGÍA	28
8.1. Selección de la zona de estudio	30
8.2. Datos de partida	30
8.3. Procesado de la nube de puntos LIDAR	30
8.3.1. Clasificación	32
8.3.1.1. Detección de la vegetación	32
8.3.1.2. Detección de los edificios	32
8.3.1.3. Superficie del terreno	33
8.3.1.4. Clasificación de la vegetación	33

8.3.2. Edición	34
8.3.2.1. Revisión de la clasificación	34
8.3.2.2. Eliminación del ruido	36
8.3.3. Delimitación de los edificios	37
8.3.4. Nube de puntos LIDAR clasificada	37
8.4. Modelo 3D de la zona urbana	38
8.5. Superficie de tejados disponible	39
8.5.1. Criterios	39
8.5.1.1. Pérdidas por inclinación y orientación	40
8.5.1.1.1. Inclinación	41
8.5.1.1.2. Orientación.....	41
8.5.1.1.3. Cálculo de las pérdidas por inclinación y orientación	42
8.5.1.2. Sombreado	43
8.5.1.3. Accesibilidad a los tejados	47
8.5.1.4. Monumentos y edificios singulares	48
8.5.2. Superficie de tejados	49
8.5.2.1. Superficie total de tejados útil	49
8.5.2.2. Estadísticas de superficie de tejados	50
8.6. Determinación de la irradiación solar	51
8.7. Potencia instalada	53
8.8. Energía producida	56
8.9. Asignación de resultados a los edificios	58
9. RESULTADOS	59
10. CONCLUSIÓN	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
RECURSOS DIGITALES	66
ANEXO I. HERRAMIENTA DE MULTIPLICACIÓN DE CAPAS RÁSTER	68
ANEXO II. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DE TEJADOS	69
ANEXO III. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE LA POTENCIA INSTALADA	72
ANEXO IV. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE LA ENERGÍA	75
ANEXO V. HERRAMIENTA PARA ASOCIAR LOS EDIFICIOS Y RESULTADOS	78
ANEXO VI. SUBMODELO DEL MAPA DE SOMBRAS	79
ANEXO VII. SUBMODELO DE ESTADÍSTICA DE ZONA ITERADA	80
ANEXO VIII. MODELO GENERAL	81

1. INTRODUCCIÓN

Cada vez somos más conscientes del importante impacto sobre el medio ambiente que ocasiona el ser humano. En el desarrollo de nuestras actividades, incluso la más normales y cotidianas, originamos algún tipo de contaminación en el entorno que debemos intentar amortiguar en todo lo posible. Un serio problema al que nos enfrentamos, relacionado con el desarrollo industrial y el crecimiento económico, lo constituye el incremento de la contaminación en las ciudades como consecuencia de un consumo excesivo e ineficiente de energía.

La atmósfera es fundamental para la vida por lo que sus alteraciones tienen una gran repercusión en todo el planeta. La producción y el consumo de energía ocasionan cambios en la composición química de la atmósfera que, entre otros, contribuyen a la alteración del clima, el calentamiento global o generan lluvia ácida, dando lugar a graves afecciones medioambientales. Pero las actividades de producción energética no sólo afectan a la atmósfera, también tienen efectos sobre la hidrosfera, el suelo y los seres vivos en general.

Sin embargo, el desarrollo de las fuentes de energía renovables puede contribuir a la reducción de la contaminación y supone para muchos países poder utilizar recursos energéticos propios, disminuyendo la dependencia que tienen de la importación de combustibles fósiles como el petróleo o el gas. Debido a su climatología y el número de horas de Sol al año, España es uno de los países europeos con mayor radiación anual. Esta ubicación privilegiada nos proporciona la oportunidad de explotar una fuente de energía limpia y segura con una buena productividad y rentabilidad.

Una importante prioridad en las políticas energéticas de todos los países debería ser promover una transición hacia un modelo energético basado en el uso racional de la electricidad, la mejora de la eficiencia en las instalaciones y la utilización de energías renovables. Para adaptarse a esta situación, la Unión Europea (UE) a través de la Directiva 2009/28/CE ha desarrollado un conjunto de medidas destinadas a fomentar el abastecimiento energético procedente de fuentes renovables.

Todos los Estados miembros deben desarrollar planes⁽¹⁾ que establezcan los objetivos nacionales obligatorios en las cuotas de energías renovables relativas al transporte, la electricidad y la producción de calor. Concretamente, se ha fijado un objetivo con una cuota mínima de energía procedente de fuentes renovables para el año 2020 del 20% en el consumo final bruto de energía y del 10% en el sector del transporte.

En los últimos años han crecido significativamente las investigaciones para desarrollar el sector de las energías renovables. Una de estas fuentes de energía, gratuita y con potencial para cubrir las necesidades energéticas de la población es la energía solar.

⁽¹⁾ En España se elaboró el “Plan de acción nacional de energías renovables (PANER) 2011-2020”.

La electricidad fotovoltaica debería convertirse en el futuro en una fuente principal de energía si los países promueven políticas energéticas adecuadas. Aunque todavía sigue siendo un método costoso de producción eléctrica, el descenso rápido en los precios de estos sistemas podría lograr una equiparación con otras fuentes de energía en varios años. En Europa se ha pasado de una potencia instalada de 1 GW en el año 2003 a más de 13 GW en 2010, llegándose a los 21,9 GW en 2011. La energía fotovoltaica cubre un 2% de la demanda y aproximadamente el 4% de la demanda pico (EPIA, 2011).

Actualmente la mitad de la población mundial habita en núcleos urbanos y según las previsiones de la ONU se estima que llegará hasta el 60% en dos décadas⁽²⁾. Las ciudades consumen gran cantidad de energía pero también pueden producirla. La energía solar tiene la ventaja de poder generarse en el mismo lugar donde se consume gracias a las posibilidades que ofrece la integración de los sistemas fotovoltaicos en las edificaciones.

Como se refleja en la Directiva 2010/31/UE, *“El 40% del consumo total de la energía en la Unión Europea corresponde a los edificios”*. Estas condiciones han llevado a la UE a promover el desarrollo de la energía fotovoltaica como parte de los programas de mejora para la eficiencia energética de los edificios. A finales del año 2020 los edificios nuevos o reformados al menos en un 25% estarán obligados a cumplir unos requisitos altos de eficiencia energética y tenderán a un consumo energético que debería proceder de fuentes renovables.

Cuando se pretende implementar políticas destinadas a la generación de energía fotovoltaica, una cuestión importante es determinar qué porcentaje de las necesidades energéticas de las ciudades puede ser cubierta con la producción propia de electricidad. La estimación de los recursos energéticos depende de las características de la zona como la situación geográfica y las condiciones climáticas, siendo los Sistemas de Información Geográfica (SIG) una herramienta muy útil para este análisis.

Una de las características principales de los SIG es su capacidad de integración de información alfanumérica y datos espaciales georreferenciados que permite ofrecer una visión conjunta del territorio. En este sentido se han convertido en un elemento necesario en el tratamiento de información espacial compleja cuando se realizan estudios de planeamiento territorial.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo geográfico, basado en SIG, que analice la posibilidad de instalar sistemas solares para la generación de energía eléctrica en entornos urbanos. En este caso, el lugar seleccionado para el estudio es una zona en el casco urbano del municipio de Miraflores de la Sierra, situado en la Comunidad de Madrid.

⁽²⁾ State of the World's Cities 2008/2009 - Harmonious Cities. ONU-Habitat.

El aprovechamiento de la energía solar en las edificaciones presenta diferentes opciones tecnológicas tales como los sistemas térmicos (captan el calor mediante colectores térmicos) y fotovoltaicos (producen electricidad a través de módulos fotovoltaicos). Este trabajo se centrará únicamente en el estudio del potencial fotovoltaico, descartando la evaluación de potencial térmico aunque el procedimiento para su determinación sería similar.

La metodología del estudio incluirá los siguientes objetivos específicos:

- Calcular la superficie total útil disponible en los tejados de edificios para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos y seleccionar los emplazamientos idóneos.
- Determinar la radiación solar recibida en la zona seleccionada.
- Estimar la potencia instalada y la producción eléctrica fotovoltaica.

El análisis realizado se basará principalmente en un modelo urbano en 3D generado a partir de datos LIDAR⁽³⁾, utilizando como herramienta para el tratamiento de los mismos los Sistemas de Información Geográfica.

3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1. Irradiación solar

El Sol como principal fuente de energía emite radiación en forma de ondas electromagnéticas. No toda la radiación solar que alcanza la atmósfera llega a la superficie debido a que las condiciones meteorológicas, la topografía y las características de la superficie del terreno influyen sobre la misma. Sin olvidar que dependiendo de la latitud y la hora del día la radiación solar recibida en cualquier punto del planeta también varía.

La irradiación global⁽⁴⁾ incidente en una superficie está formada por tres componentes (directa, difusa y reflejada), en función de cómo llega a los objetos situados en la superficie terrestre:

- **Radiación directa:** Es la radiación que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección.
- **Radiación difusa:** Está originada por la dispersión de la radiación debida a la acción de los agentes atmosféricos (nubes, polvo, etc.).
- **Radiación reflejada (albedo):** Fracción de la radiación solar que es reflejada por el suelo o por los objetos cercanos.

⁽³⁾ LIDAR (Light Detection and Ranging) es un sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomándolos mediante un escáner láser aerotransportado.

⁽⁴⁾ La unidad de medida es el kWh/m².

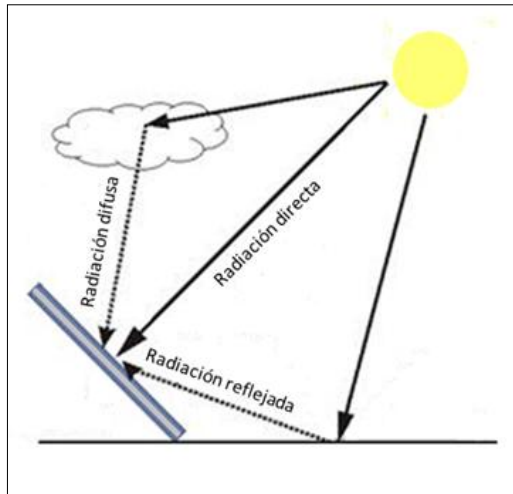


Figura 1. Esquema de la radiación solar.

3.2. Posición del Sol

Desde una ubicación fija en la superficie terrestre, el Sol parece moverse a lo largo del cielo. La posición del Sol depende de la ubicación de un punto de la Tierra, la hora del día y la época del año. Este movimiento aparente del Sol, causado por la rotación de la Tierra alrededor de su eje, cambia el ángulo en el que la luz llega al terreno y tiene un gran impacto en la cantidad de energía recibida por los módulos fotovoltaicos. La posición del Sol se puede definir por dos ángulos:

- **Acimut:** Posición angular del Sol expresada en grados de 0 a 360 tomando como posición inicial el norte y medido en sentido horario.
- **Altura:** Ángulo vertical formado entre el horizonte y el Sol cuyo valor oscila de 0 a 90 grados.

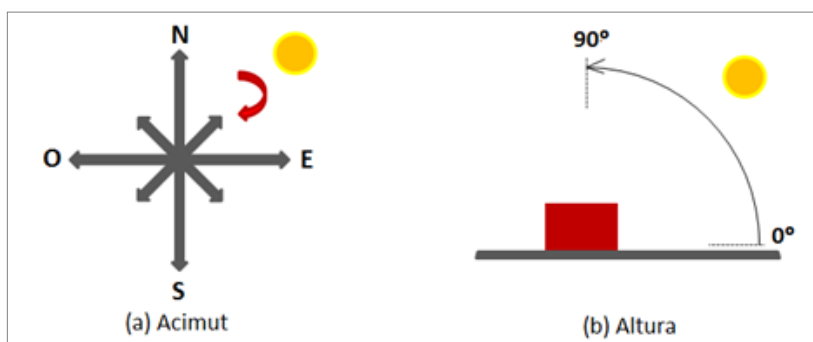


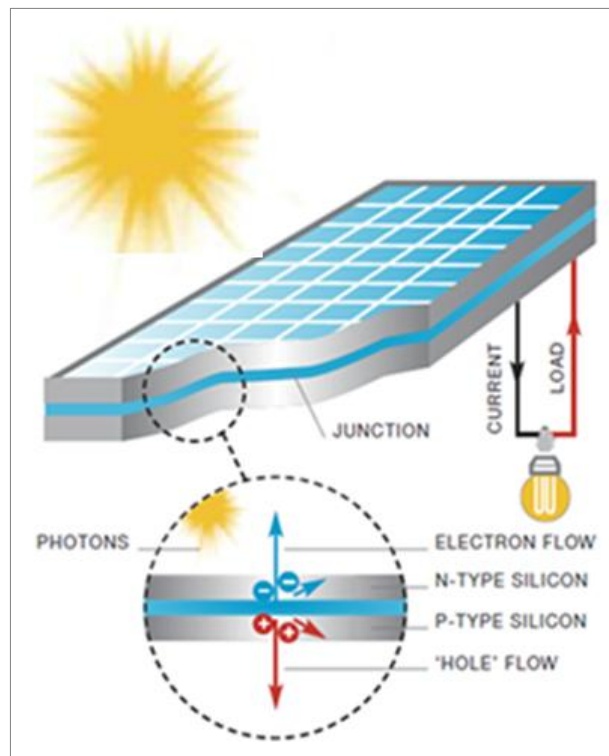
Figura 2. Ángulos relativos a la posición del Sol.

3.3. Tecnología fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es el proceso de transformación de la luz solar directamente en electricidad mediante células solares. Dentro de cada célula hay capas de un material

semiconductor especialmente tratado formando dos capas (positiva en una parte y negativa en la otra) para formar un campo eléctrico. Cuando la luz solar incide sobre la célula se liberan electrones a través de las capas formando una corriente eléctrica.

Un sistema fotovoltaico consta de varios componentes que incluyen las células solares, conexiones eléctricas, soportes y sistemas para regular la salida eléctrica (inversor⁽⁵⁾). Debido a la baja tensión de una célula solar individual, necesitan ser combinadas y conectadas entre sí en una matriz de varias células formando los módulos fotovoltaicos.



Fuente: EPIA⁽⁶⁾.

Figura 3. Esquema del efecto fotovoltaico.

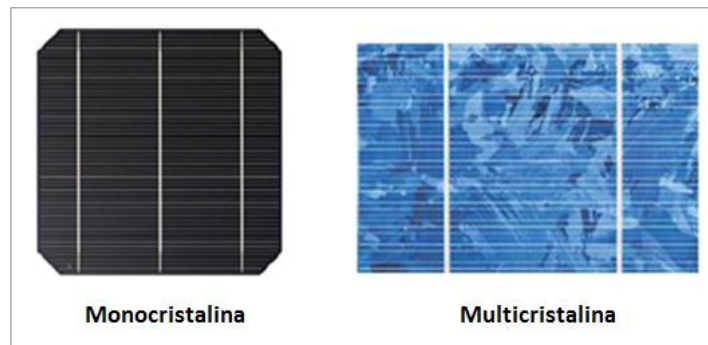
3.4. Tipos de células fotovoltaicas

Las células son la unidad básica de los sistemas fotovoltaicos donde se produce la transformación de la luz solar en energía eléctrica. En líneas generales los principales tipos de células fotovoltaicas son los siguientes:

- **Células de cristal de silicio:** Están formadas por una serie de láminas cortadas a partir de un único cristal de silicio (monocristalinas) o a partir de un bloque formado de múltiples cristales de silicio (multicristalinas). Los módulos monocristalinos tienen ligeramente mayor eficiencia y un coste superior que los módulos multicristalinos. Esta es la tecnología más común y de mayor presencia en el mercado.

⁽⁵⁾ Inversor: Dispositivo electrónico que convierte la corriente continua de la instalación fotovoltaica en corriente alterna para la alimentación de los receptores.

⁽⁶⁾ EPIA: European Photovoltaic Industry.



Fuente: EPIA.

Figura 4. Células fotovoltaicas de cristal de silicio.

- **Células de lámina delgada:** Se forman depositando capas delgadas de material fotosensible sobre un sustrato flexible de vidrio, plástico o acero inoxidable. Estos módulos son menos costosos pero tienen tasas de eficiencia menores, siendo necesaria una mayor superficie para la misma cantidad de potencia instalada.



Fuente: EPIA.

Figura 5. Módulo de lámina delgada TeCd.

- **Células de concentración fotovoltaica:** Utilizan lentes orientadas continuamente hacia el Sol para enfocar la luz sobre las células fotovoltaicas. Estos sistemas utilizan sólo radiación directa, siendo más eficientes en zonas muy soleadas con alta disponibilidad de la misma. Las células se pueden basar en compuestos de silicio o arseniuro de galio.

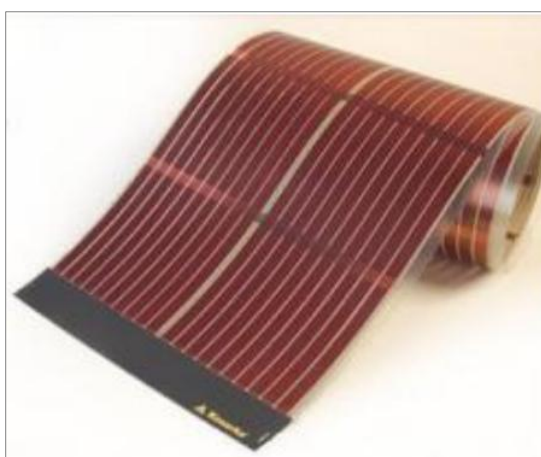


Fuente: energiasrenovables.es.

Figura 6. Módulo de concentración fotovoltaica.

- **Otros tipos de células:** Los nuevos tipos de células flexibles están basados en procesos de fabricación similares a las células de lámina delgada que les proporcionan importantes ventajas para su integración en edificios.

También se están desarrollando células fotovoltaicas orgánicas (OPV), células híbridas sensibilizadas con colorante (DSSC) que utilizan moléculas orgánicas de colorante para absorber la luz solar y las células termo-fotovoltaicas (TPV) que pueden ser utilizadas en los sistemas producción combinada de calor y electricidad.



Fuente: energiasrenovables.es.

Figura 7. Células fotovoltaicas orgánicas.

Las dos grandes categorías de tecnologías fotovoltaicas disponibles en el mercado para las edificaciones son las células de silicio (monocristalinas y multicristalinas) y las células de lámina delgada. Hoy en día, estas tecnologías representan el 85% del mercado.

Los rangos de eficiencia y el área necesaria para generar 1 kWp⁽⁷⁾ correspondientes a las diferentes tecnologías existentes se resumen en la siguiente tabla:

	TECNOLOGÍA					
	Cristal de silicio		Lámina delgada			
	Mono	Multi	(a-Si)	(TeCd)	Cl(G)S	asSi/μc-Si
Eficiencia - Célula	16-23 %	14-19 %	4-8 %	10-11 %	7-12 %	7-9 %
Eficiencia - Módulo	13-20 %	11-16 %				
Área necesaria por kW (módulo)	~ 7 m ²	~ 8 m ²	~ 15 m ²	~ 10 m ²	~ 10 m ²	~ 12 m ²

Fuente: EPIA, 2010.

Tabla 1. Eficiencia de los módulos fotovoltaicos basada en condiciones estándar⁽⁸⁾.

⁽⁷⁾ Kilovatio pico (kWp): Es la potencia eléctrica máxima que proporciona un panel fotovoltaico en condiciones estándar de medida.

⁽⁸⁾ Condiciones estándar: Condiciones de irradiancia (1000 W/m²), distribución espectral AM (1,5 G) y temperatura (25 °C) en la célula solar utilizadas universalmente para caracterizarlas.

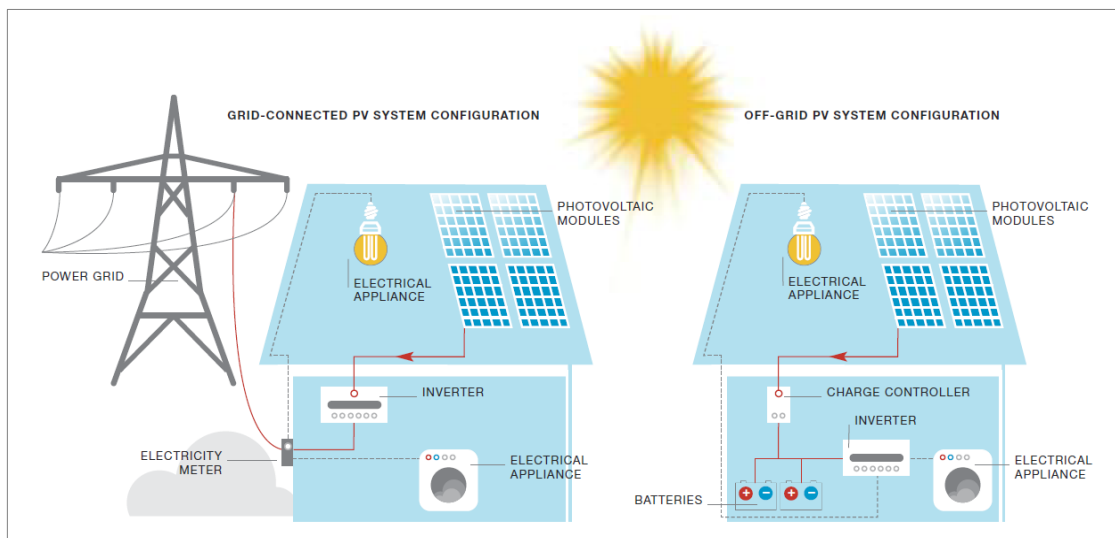
3.5. Instalaciones fotovoltaicas en edificaciones

En la actualidad se da cada vez más importancia a mejorar la eficiencia energética, ya sea en el diseño de nuevos edificios como en la rehabilitación de los existentes (siempre que sea posible). Obviamente, la implementación de sistemas fotovoltaicos como fuente de energía forma parte del conjunto de estrategias que se están desarrollando para conseguirlo.

En España, el Código Técnico de la Edificación (CTE) en su 'Documento Básico HE' establece el marco normativo que describe las características básicas que deben cumplir las edificaciones en relación con el ahorro de energía. El CTE enumera una serie de nuevos edificios que dependiendo del uso y dimensiones *"incorporarán sistemas de captación y transformación de energía solar por procedimientos fotovoltaicos"* entre los que se incluyen hipermercados, centros de ocio, naves, hoteles y centros sanitarios.

Las instalaciones fotovoltaicas se pueden ubicar en entornos urbanos y en zonas remotas donde no existen infraestructuras energéticas cercanas. En general se puede diferenciar entre dos tipos de sistemas:

- **Instalaciones conectadas a la red** eléctrica en las que el exceso de energía producida puede alimentar a la red.
- **Instalaciones aisladas** que están equipadas con baterías y pueden almacenar la energía producida para utilizarla posteriormente.



Fuente: EPIA.

Figura 8. Sistemas conectados a la red y sistema aislado.

3.5.1. Tipos de tejados

Los tejados de los edificios suele ser una zona disponible y a veces desaprovechada que puede utilizarse para instalaciones fotovoltaicas. En las viviendas el espacio es mucho

menor pero, en ocasiones las dimensiones de los tejados son considerables como es el caso de las zonas industriales, comerciales o de ocio.

Aunque la ubicación de los paneles en los tejados y cubiertas es una opción bastante extendida, no es la única, también existen otras posibilidades. En los últimos años se han desarrollado sistemas fotovoltaicos integrados en revestimiento de fachadas, ventanas, voladizos, lucernarios, marquesinas o cualquier otro elemento de los edificios que a la vez actúa de cerramiento y de sistema generador de energía.

Las variedades de tejados más comunes son los inclinados (con una o dos vertientes) y planos. También existe la posibilidad de encontrar cubiertas con características curvadas pero son menos frecuentes.



Fuente: ASIF⁽⁹⁾.

Figura 9. Tipos de tejados.

3.5.2. Módulos fotovoltaicos sobre tejados

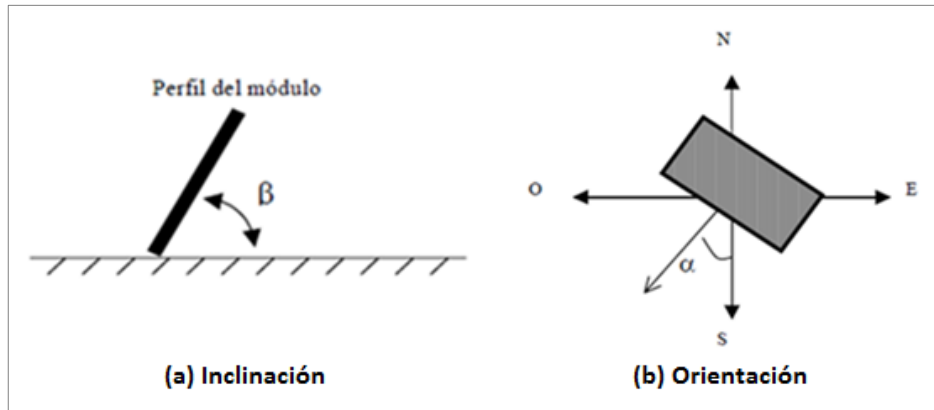
No todos los edificios tienen una posición adecuada para captar la radiación solar. Dependiendo de su situación, el aprovechamiento que realizan los módulos fotovoltaicos de la radiación solar recibida varía considerablemente. Los módulos se instalan sobre los tejados planos situados sobre una estructura con una inclinación y orientación determinada para maximizar su eficiencia. En los tejados inclinados la posición de los módulos viene determinada por las características del mismo, debiendo situarse los paneles en aquellas zonas del tejado donde las pérdidas de energía del sistema sean lo menores posible.

La posición de los módulos fotovoltaicos está definida por dos ángulos que influirán en la cantidad de radiación solar que recibirá el sistema instalado:

- **Inclinación:** Ángulo formado por el plano del módulo y el plano horizontal. El ángulo de inclinación para optimizar la producción energética anual suele ser algunos grados inferior a la latitud local (aproximadamente 10°).

⁽⁹⁾ ASIF: Asociación de la Industria Fotovoltaica.

- **Orientación:** Ángulo formado por la proyección sobre el plano horizontal de la normal al plano del módulo y la dirección óptima (en el hemisferio norte se utiliza la dirección sur y en el hemisferio sur la dirección norte).



Fuente: CTE.

Figura 10. Inclinación y orientación de los módulos fotovoltaicos.

En las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, la situación óptima de los módulos será aquella que permita maximizar la energía que es capturada por el sistema a lo largo del año. Como método de cálculo del porcentaje de pérdidas de energía se emplearán las siguientes ecuaciones del CTE según la inclinación de la cubierta:

$$\text{Pérdidas}(\%) = 100 \cdot [1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \phi + 10)^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2] \quad \text{para } 15^\circ < \beta < 90^\circ$$

$$\text{Pérdidas}(\%) = 100 \cdot [1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \phi + 10)^2] \quad \text{para } \beta \leq 15^\circ$$

α = Ángulo de acimut (orientación).

β = Ángulo de inclinación (0° para orientación sur, -90° para orientación este y $+90^\circ$ para orientación oeste).

ϕ = Latitud del lugar.

α , β y ϕ se expresan en grados sexagesimales.

3.6. Potencia instalada

“Definimos la potencia instalada en corriente alterna de una central fotovoltaica conectada a la red, como la potencia de corriente alterna a la entrada de la red eléctrica para un campo fotovoltaico con todos sus módulos en un mismo plano y que opera, sin sombras, a las condiciones estándar de medida” (IDAE).

En un sistema fotovoltaico conectado a la red, la potencia instalada (en kWp) para cada tecnología de módulos fotovoltaicos en una superficie determinada se calcula con la fórmula (Wiginton, Nguyen y Pearce, 2010):

$$P = I_g * e * A_{PV}$$

P = Potencia instalada.

I_g = Irradiación global = 1 kW/m² (en condiciones estándar de medida).

e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

A_{PV} = Superficie de tejado disponible.

3.7. Energía

La energía total anual producida (en kWh) se calcula a partir de la fórmula (Wiginton, Nguyen y Pearce, 2010):

$$E = I_{md} * 365 * e * A_{PV}$$

E = Energía anual.

I_{md} = Media diaria de la irradiación solar global (kWh/m²día).

e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

A_{PV} = Superficie de tejado disponible.

Además de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos (e), otro coeficiente que hay que tener en cuenta es el rendimiento energético de la instalación o “Performance Ratio” (PR) que evalúa la calidad de una instalación fotovoltaica independientemente de la inclinación y orientación de los módulos. En el PR se incluyen factores como las pérdidas por la dependencia de la temperatura, la eficiencia del cableado, pérdidas por presencia de suciedad en la instalación, eficiencia energética del inversor u otros. Se aplicará un valor por defecto de PR del 80% (0,8) que supone una disposición óptima del sistema y que no hay pérdidas por sombras (Amador, J.). La fórmula para determinar la energía considerando el PR será la siguiente:

$$E = I_{md} * 365 * e * A_{PV} * PR$$

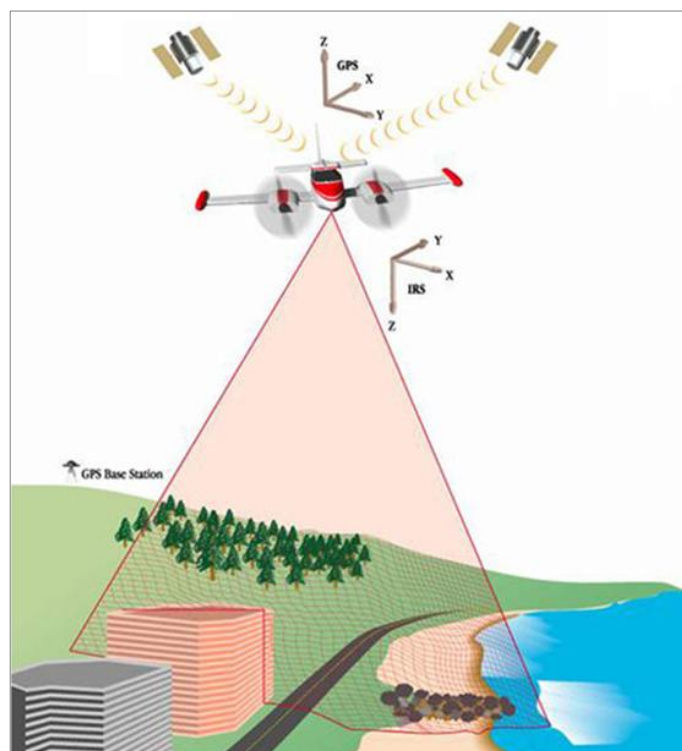
4. LIDAR

4.1. Tecnología LIDAR

LIDAR (Light Detection and Ranging) es una tecnología de teledetección óptica que utiliza pulsos de luz láser para muestrear la superficie terrestre. Al realizarse un barrido del terreno, determina la altura y forma de cualquier elemento sobre el suelo como los árboles, edificios, infraestructuras e incluso vehículos. Las principales ventajas de los sensores LIDAR son la alta resolución de los datos capturados y la capacidad para obtener información bajo la cubierta de vegetación.

Los sistemas LIDAR pueden ser aerotransportados o terrestres, dependiendo de si la toma de datos se realiza por medios aéreos, vehículo o desde un punto fijo utilizando un trípode. Un sistema LIDAR aerotransportado está constituido por los siguientes elementos principales:

- El **transporte aéreo** que puede tratarse de un avión o un helicóptero.
- Un **sistema de escáner láser** para determinar la distancia a los elementos midiendo el tiempo transcurrido desde que se emite el haz de luz y la detección de la señal reflejada en un objeto o superficie.
- Un **GPS** (Sistema de Posicionamiento Global) instalado en el avión que permite saber la altura y posición del mismo. También se registra con GPS una posición conocida en tierra que posteriormente servirá para corregir los datos de posición y proporcionarles mayor precisión.
- El **INS** (Sistema Inercial de Navegación) con el que se recoge información de la orientación, giros e inclinación del avión.



Fuente: www.sanctuarysimon.org.

Figura 11. Esquema de funcionamiento de la tecnología LIDAR.

Otra de las ventajas de la tecnología LIDAR es la capacidad del sensor de recoger información de varios pulsos reflejados por cada pulso láser emitido por el sistema, aumentando su capacidad para determinar la forma tridimensional de los elementos. Cuando un pulso láser se reflejan en un objeto, puede ocasionar uno o múltiples rebotes debido a que el pulso va localizando diferentes superficies reflectoras hasta que llega al suelo. Cuando sólo se recoge un reflejo suele representar el suelo, sin embargo cuando aparecen varios reflejos corresponden a elementos con diferentes alturas como los árboles y edificios.

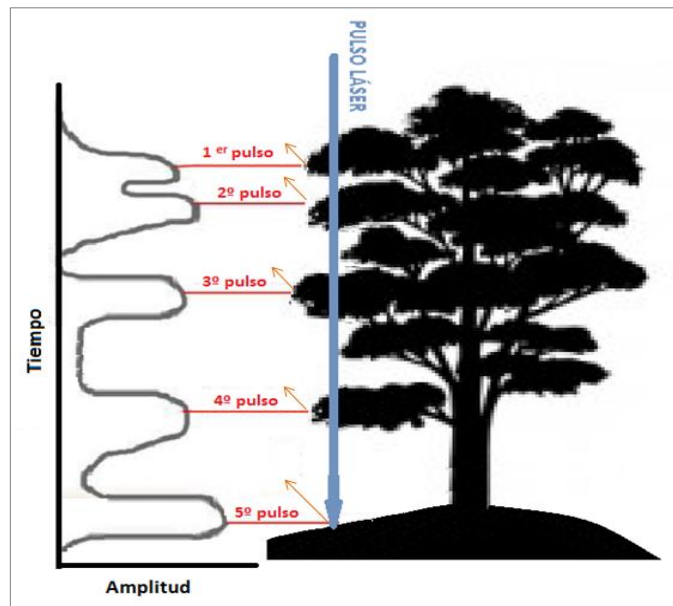
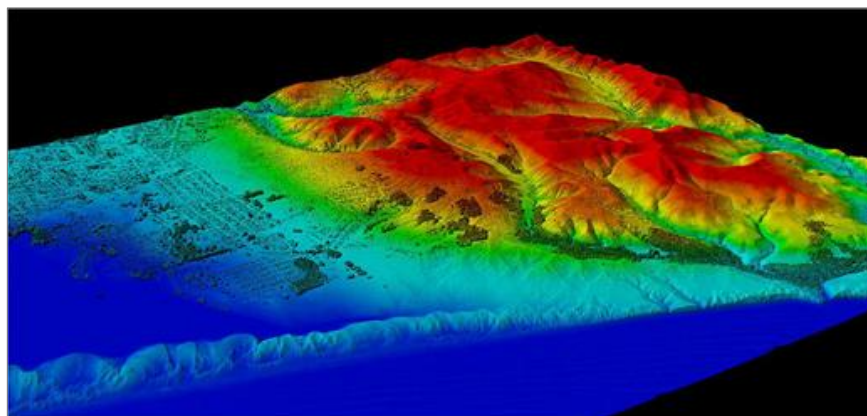


Figura 12. Esquema de los retornos de un pulso láser emitido.

4.2. Datos LIDAR

Una vez obtenidos los datos, el primer paso es extraerlos del sistema. En este proceso se validan los datos de sensor láser con la posición dada por el GPS y la información del INS. Como resultado se obtiene una nube de puntos de elevación georreferenciados con una alta precisión.

Generalmente los sistemas y aplicaciones que trabajan con LIDAR utilizan el formato LAS como estándar para este tipo de datos. Estos archivos son de tipo binarios, caracterizándose por necesitar un menor espacio que los archivos ASCII convencionales y además por mantener toda la información procedente del sistema LIDAR. El formato LAS ha sido desarrollado por la American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS).



Fuente: NOAA.

Figura 13. Nube de puntos LIDAR.

Posteriormente los puntos LIDAR se filtran y clasifican, asignándoles un valor numérico correspondiente a los diferentes objetos representados que ha captado el pulso láser. Es posible asignar diferentes tipos de clasificaciones que pueden incluir las categorías de suelo/terreno y la cubierta vegetal. Sin embargo, una opción es trabajar con los códigos de clasificación definidos previamente por la ASPRS para los datos en formato LAS⁽¹⁰⁾.

VALOR	DESCRIPCIÓN
0	Creados, nunca clasificados
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificios
7	Puntos bajos (ruido)
8	Modelo de puntos clave (Nube de puntos)
9	Agua
10	Reservado para definirlos por la ASPRS
11	Reservado para definirlos por la ASPRS
12	Puntos solapados
13-31	Reservado para definirlos por la ASPRS

Tabla 2. Clasificación de datos LIDAR.

A partir de la nube de puntos clasificada se obtienen otros productos como modelos digitales de superficie (MDS) y modelos digitales del terreno (MDT) que son útiles en estudios de inundaciones, forestales, gestión de zonas costeras, cartografía, planificación urbana, gestión de infraestructuras, arqueología y otras aplicaciones.

5. ANTECEDENTES

En los últimos años se han llevado a cabo diferentes trabajos para la evaluación del potencial solar fotovoltaico en entornos urbanos que representan una importante contribución al establecimiento de programas de generación de energía solar en las edificaciones. En el caso de Izquierdo et al. (2008) desarrollan una metodología en la que integran una estimación de los tejados disponible en edificios para instalaciones solares con la cuantificación de los errores cometidos en el análisis. El área de estudio incluye toda España, tomando como base la unidad administrativa de los términos municipales y donde las zonas urbanas son las clasificadas como tal en el Corine Land Cover⁽¹¹⁾.

⁽¹⁰⁾ Clasificación aprobada por la ASPRS en Noviembre 2011.

⁽¹¹⁾ El proyecto Corine Land Cover tiene como objetivo obtener una base de datos sobre usos del suelo en la Unión Europea. Está dirigido por la Agencia Europea de Medio Ambiente.

Además del estudio de la irradiación y la consideración de las características técnicas de los equipos utilizados, calculan el área de tejados per cápita estableciendo una proporción entre la densidad de edificios y la población, sin olvidar definir la tipología media de edificaciones existentes y determinar su idoneidad para albergar este tipo de instalaciones.

En otros análisis del potencial solar fotovoltaico como Wiginton, Nguyen y Pearce (2010) también tienen en cuenta la relación entre la superficie de tejados y la población. Utilizan la sección censal como unidad geográfica en su estudio de la provincia de Ontario (Canadá) y consideran la reducción de la superficie útil debido a las sombras, orientación y otros usos de los tejados.

A partir de la cartografía digital disponible, La Gennusa et al. (2011) generan un modelo digital de elevación eliminando áreas restringidas como las zonas monumentales. Para la determinación de la superficie de tejados disponibles establecen un factor de sombra calculado con ArcGis y definido por la relación entre las superficies sombreadas y el total de las cubiertas (siempre planas). La inclinación de los paneles solares es el otro factor que consideran en su metodología.

En ocasiones se utilizan programas con modelos informáticos para evaluar el potencial fotovoltaico. Hofierka y Kaňuk (2009) a partir de un modelo 3D de la ciudad que incluye un modelo digital del terreno y de edificios, con la aplicación r.sun⁽¹²⁾ primero realizan un análisis espacial y temporal de la radiación solar y a continuación, calculan la producción potencial de electricidad con PVGIS⁽¹³⁾.

Para la identificación de las diferentes tipologías de tejados en los edificios, las imágenes aéreas son una fuente de información a considerar. Bergamasco y Asinari (2011) aplican un algoritmo que les permite analizar ortofotografías. En el muestreo de los tejados se analiza la superficie de tejados disponible, las zonas afectadas por sombras u otros elementos presentes en los tejados (chimeneas, instalaciones de climatización, ascensores, etc.) y el ángulo acimutal de las posibles instalaciones.

Un elemento importante en el cálculo de la superficie de tejados disponibles es descartar todas aquellas zonas que están afectadas por sombras. En este sentido, Melo et al. (2013) desarrollan una matriz de sombras compuesta por los valores del factor de sombra alrededor de toda la bóveda solar y analizan los efectos de las sombras en las diferentes componentes de la radiación solar. En este estudio proponen una metodología para estimar el factor de sombras y la irradiación con modelos de superficies tridimensionales en un entorno urbano teniendo en cuenta diferentes condiciones del cielo.

⁽¹²⁾ El modelo r.sun permite calcular la radiación directa, difusa y reflejada en mapas raster de irradiación solar para un determinado día, latitud, superficie y condiciones atmosféricas.

⁽¹³⁾ PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) permite evaluar la generación de electricidad a partir de sistemas fotovoltaicos en Europa, África y Asia Sudoccidental.

El número de factores analizados es muy diverso y a través de modelos estadísticos se puede determinar las variables más significativas en un estudio. Arboit et al. (2008) evalúan el potencial solar en la ciudad de Mendoza (Argentina) como ejemplo de un entorno urbano de baja densidad. Analizando las diferentes variables consideran que tiene una mayor influencia la morfología de los edificios y la orientación de las manzanas. También son consideradas otras variables como el porcentaje de ocupación del suelo, anchura de las calles y la distribución de las zonas arboladas.

Últimamente se han realizado trabajos basándose en la tecnología LIDAR como Brito et al. (2012) que proponen una aproximación en la estimación del potencial fotovoltaico en zonas urbanas a partir de este tipo de datos. Sugieren un procedimiento sencillo considerando únicamente la superficie horizontal de los edificios y descartando un análisis tridimensional con el que se podrían añadir al estudio otras variables como el sombreado, la orientación y la inclinación. Sin embargo, en este campo Nguyen y Pearce (2012) desarrollan un algoritmo que utiliza modelos digitales de superficie generados a partir de datos LIDAR para identificar los tejados y calcular pérdidas por sombras.

Algunos trabajos consideran áreas de estudio más pequeñas y se centran en analizar edificios individuales y su entorno. Díaz-Vilariño et al. (2013) proponen una metodología para la generación de un 'Modelo de Información de Edificios' que permita definir las superficies apropiadas para las instalaciones solares. La toma de datos se realiza con un escáner láser terrestre situado en diferentes ubicaciones para maximizar el área cubierta de los edificios. Además, se incluyen datos de los alrededores de los edificios, especialmente aquellos elementos circundantes que puedan generar sombras.

6. FUENTES DE INFORMACIÓN

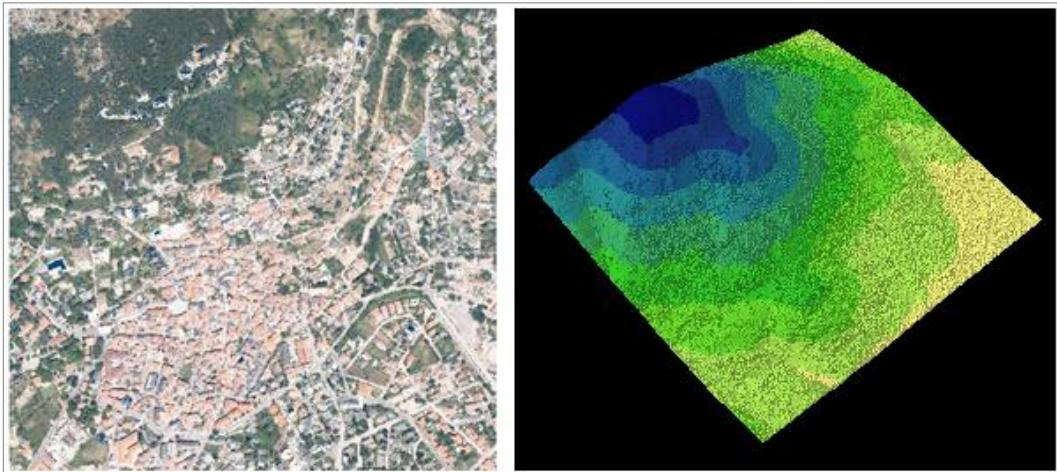
De la etapa inicial del análisis, correspondiente a la recopilación de la información dependerá la precisión de los resultados finales obtenidos al poder utilizar un mayor o menor número de factores. Un aspecto importante a considerar es el tamaño de la zona de estudio, con los datos disponibles no siempre se pueden aplicar a escala local o regional los mismos elementos de análisis (Izquierdo et al., 2008).

6.1. Datos LIDAR

Los datos LIDAR constituyen la base fundamental para realizar el análisis. Los ficheros de nube de puntos corresponden al vuelo LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Los datos presentan las siguientes características:

- Fecha de vuelo: Año 2010.
- Sistema de Referencia Geodésico ETRS89 y Proyección Cartográfica UTM huso 30.

- Los ficheros están en formato '.las' en versión 1.2 y cubren hojas de 2x2 km con una densidad media de 0,5 puntos/m² que implica un espaciamiento entre puntos menor de 1,41 m.
- Los ficheros están clasificado automáticamente incluyendo vegetación y edificaciones (con la clase terreno editada) según los estándares establecidos por la ASPRS.
- Los puntos disponen de información de color (RGB) procedente de la ortofotografía.

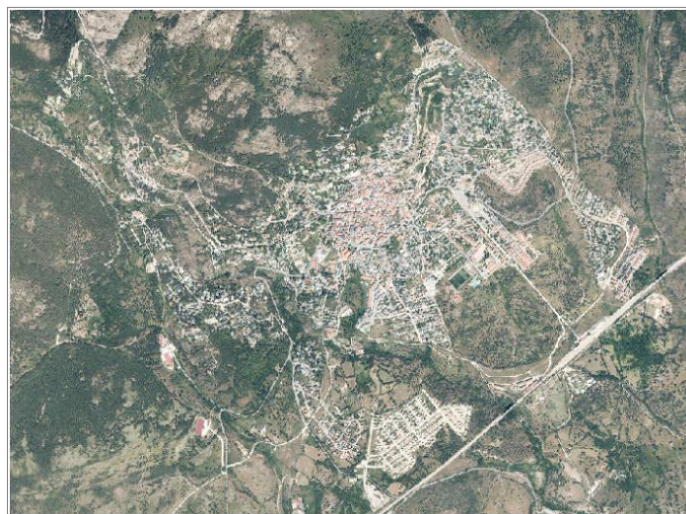


Fuente: ©Instituto Geográfico Nacional de España.

Figura 14. Datos LIDAR del Término Municipal de Miraflores de la Sierra.

6.2. Ortofotografías

Las ortofotografías del PNOA disponibles en el IGN son del año 2011. Al municipio de Miraflores de la Sierra corresponde la hoja 509 según la distribución del MTN50 (Mapa Topográfico Nacional 1:50.000). El formato de la imagen es 'ecw' y el tamaño de píxel de 25x25 cm.



Fuente: ©Instituto Geográfico Nacional de España.

Figura 15. Ortofotografía de Miraflores de la Sierra.

6.3. Catastro

La Dirección General de Catastro ofrece un servicio de consulta de la información catastral y la posibilidad de descargar la cartografía catastral vectorial en formato 'shapefile'. Se proporciona información de ámbito municipal del catastro rústico y urbano, incluyendo separadamente las diferentes capas de la cartografía disponible del año 2010. Entre otras informaciones se puede descargar el parcelario catastral (tipo de parcela y referencia catastral), manzanas urbanas, delimitación de edificios (elementos constructivos y número de plantas), vías de comunicación, hidrografía, calles y números de policía.

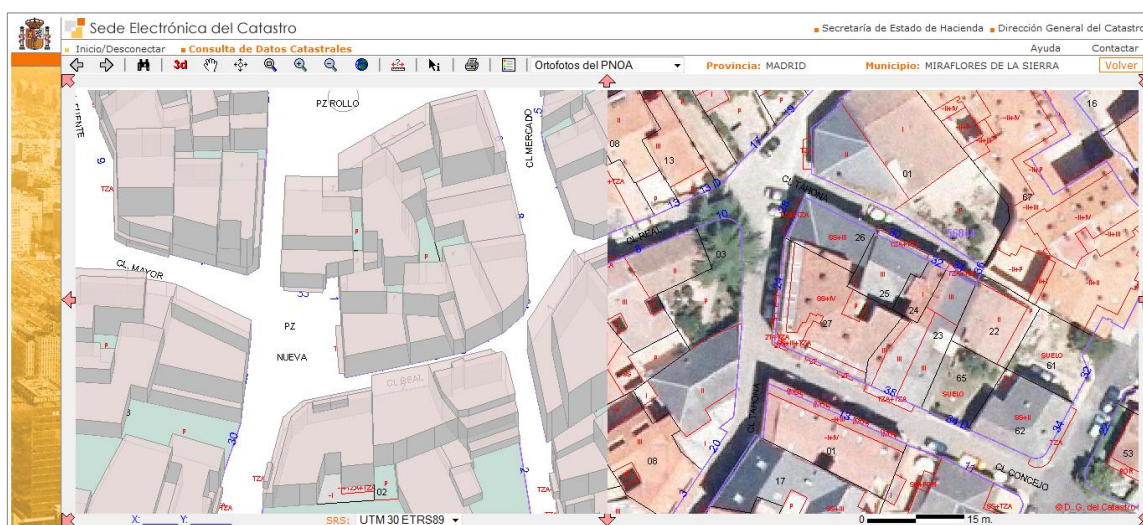


Figura 16. Consultas Catastro.

6.4. Radiación solar

6.4.1. ADRASE

Adrased es un portal del Ciemat (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) y la Unión Española Fotovoltaica (UNEF) donde se muestran datos de radiación solar a largo plazo en España correspondientes a un periodo superior a 10 años. En una localización concreta se pueden consultar valores anuales y datos mensuales de irradiación global solar horizontal en kWh/m² (promedio anual de valores diarios). La resolución aproximada del mapa es de 5x5 km.

Para la estimación de la radiación global han desarrollado una metodología a partir del tratamiento de imágenes de satélite. También se han utilizado datos de radiación medidos en más de 50 estaciones radiométricas proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

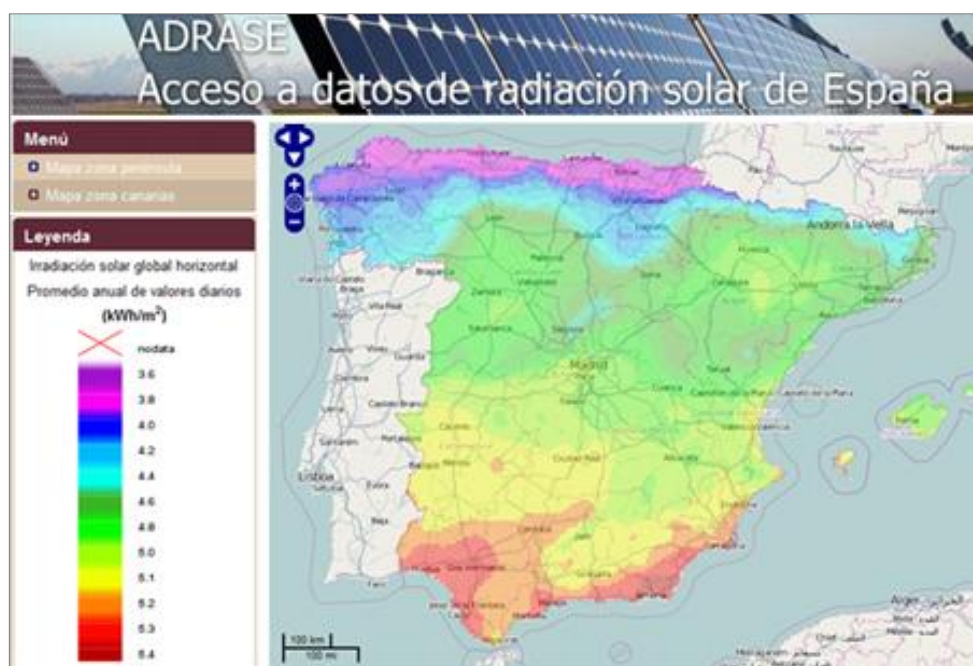


Figura 17. Portal Adrase

La zona del núcleo urbano de Miraflores de la Sierra de latitud $40^{\circ} 48' 36''$ N y longitud $03^{\circ} 46' 12''$ O recibe una irradiación solar global de $4,7 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$. Los datos mensuales obtenidos son los siguientes:

(kWh/m^2)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Percentil 75	2.4	3.6	5.4	6.5	7.4	8.2	8.0	7.1	5.6	4.1	2.7	2.1
Valor medio	1.9	3.0	4.6	5.5	6.3	7.6	7.6	6.7	5.1	3.3	2.1	1.6
Percentil 25	1.2	2.0	3.5	3.9	4.7	6.5	7.0	6.0	4.2	2.3	1.4	0.9

Tabla 3. Datos mensuales de irradiación.

6.4.2. PVGIS

La base de datos PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) ha sido desarrollada para el Instituto de Energía y Transporte de la Comisión Europea. Esta aplicación permite consultar datos de irradiación solar y diferentes parámetros climáticos de Europa, África, la Cuenca del Mediterráneo y Asia Sudoccidental. También es posible calcular la producción de energía solar de una instalación fotovoltaica definiendo una orientación e inclinación de los módulos.

Los valores de radiación solar proporcionados por PVGIS representan un total de 12 años de datos hasta 2011. Estos valores proceden de la toma de datos de diferentes estaciones meteorológicas y de la información obtenida de imágenes de satélite como el Meteosat. Aunque comparado con los valores medidos sobre el terreno los satélites proporcionan

datos menos precisos, la cobertura del terreno es mucho mayor con una resolución espacial de aproximadamente 3 km.

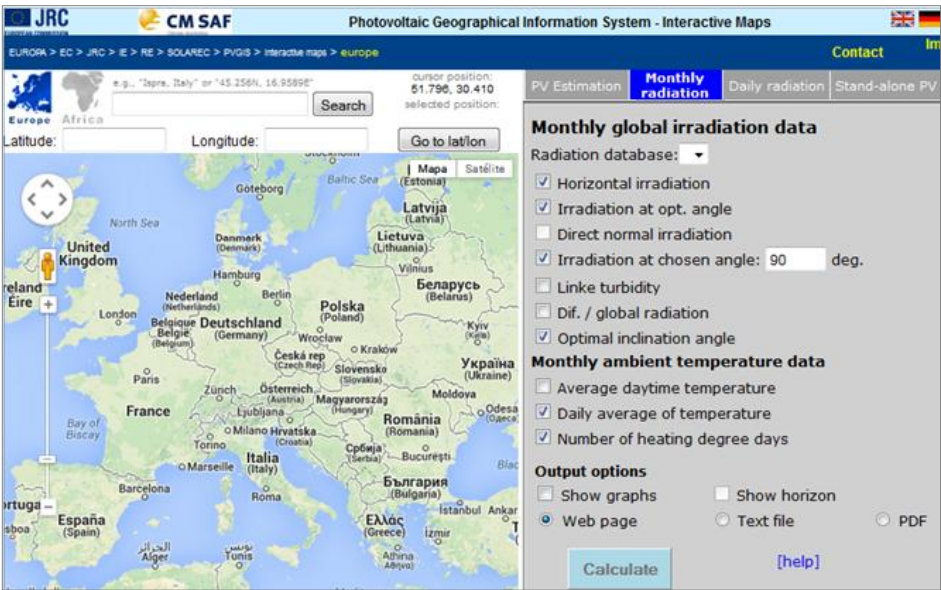


Figura 18. Portal PVGIS.

Para un lugar elegido, esta aplicación calcula promedios mensuales y anuales de irradiación global en superficies horizontales y con una inclinación. También dispone de datos como la temperatura, ángulo de inclinación óptimo, turbidez, la relación irradiación difusa/global o la estimación del déficit de la irradiación horizontal por el sombreado.

Optimal inclination angle is: 34 degrees
Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.2 %

Month	Hh	Hopt	H(90)	lopt	TL	D/G	TD	T24h	NDD
Jan	1880	3100	3120	63	3.5	0.48	4.9	4.2	371
Feb	2960	4420	4000	56	3.7	0.40	6.4	5.4	307
Mar	4170	5270	3920	43	3.2	0.39	9.8	8.4	220
Apr	5210	5660	3260	28	3.8	0.40	11.3	10.0	163
May	6110	5960	2710	14	3.8	0.39	15.3	14.0	37
Jun	7420	6900	2590	8	4.4	0.30	21.6	19.8	9
Jul	7680	7310	2830	11	4.4	0.26	23.9	22.0	5
Aug	6630	7000	3530	24	4.8	0.28	23.7	21.7	8
Sep	5010	6100	4140	39	4.4	0.31	19.4	17.6	51
Oct	3290	4620	3900	52	4.3	0.38	14.5	13.1	167
Nov	2200	3550	3480	61	4.0	0.43	8.3	7.2	346
Dec	1730	3010	3140	65	3.4	0.48	5.5	4.7	388
Year	4530	5250	3380	34	4.0	0.35	13.7	12.3	2072

Hh: Irradiation on horizontal plane (Wh/m2/day)
Hopt: Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m2/day)
H(90): Irradiation on plane at angle: 90deg. (Wh/m2/day)
lopt: Optimal inclination (deg.)
TL: Linke turbidity (-)
D/G: Ratio of diffuse to global irradiation (-)
TD: Average daytime temperature (°C)
T24h: 24 hour average of temperature (°C)
NDD: Number of heating degree-days (-)

Tabla 4. Datos de irradiación de PVGIS.

6.5. Datos de posición del Sol

El servicio web SoDa (Solar Energy Services for Professionals) es un sistema que ofrece acceso a un conjunto de información relacionada con la radiación solar. La principal

característica de este portal es que no constituye en sí mismo una librería de datos, sino que se trata de un enlace a recursos que se encuentran situados en diferentes países. Los diferentes sistemas han sido desarrollados por los siguientes proveedores: MINES ParisTech y EntPE (Francia), ISAC (Italia), Meteotest (Suiza), NCEP y la NASA (EE.UU.).



Figura 19. Portal SoDa.

Uno de los servicios disponible es Solar Geometry 2 (SG-2), biblioteca para el cálculo de la situación relativa del Sol y la Tierra. El algoritmo que han desarrollado tiene un orden de exactitud de aproximadamente $0,005^\circ$ y es válido durante el periodo comprendido entre 1980 a 2030 (Ph. Blanc y L. Wald, 2012). Este portal web genera una tabla con los datos de la posición solar para una posición determinada, seleccionando la fecha y el intervalo de tiempo deseado definido en minutos (por defecto establece 15 min.).

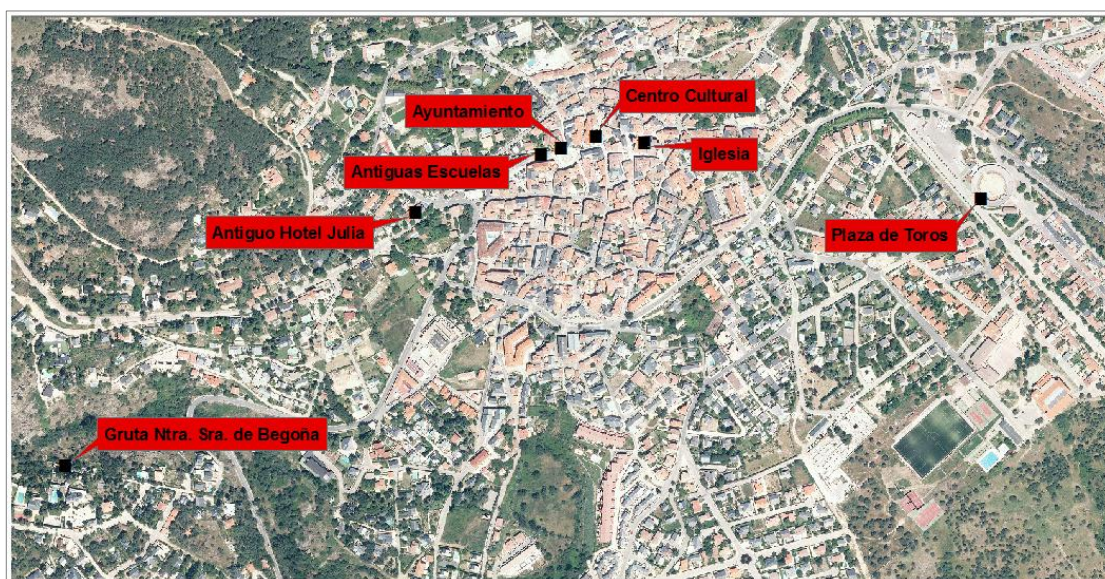
# JDUT: universal julian date (day)					# DOY: day of the year				
# YYYY: year					# DELTA: topocentric declination (radian)				
# MM: month of the year					# OMEGA: topocentric hour angle (radian)				
# DD: day of the month					# GAMMA_S0: topocentric Sun elevation angle without refraction correction (radian)				
# H: hour of the day (decimal hour)					# ALPHA_S: topocentric Sun azimuth angle Eastward from North (radian)				
#					#				
# latitude: 40,81 longitude: -3,766496					#				
# JDUT	YYYY	MM	DD	H	DOY	DELTA	OMEGA	GAMMA_S0	ALPHA_S
2456293,5	2013	1	1	0	0	-0,40148384	75947,9217	-1,25260911	6,04370315
2456293,542	2013	1	1	1	1	-0,40142428	75948,1834	-1,22460679	0,51019794
2456293,583	2013	1	1	2	2	-0,40136534	75948,4451	-1,08621679	1,00943157
2456293,625	2013	1	1	3	3	-0,40130694	75948,7068	-0,90462632	1,30414804
2456293,667	2013	1	1	4	4	-0,40124897	75948,9685	-0,7093722	1,50952505
2456293,708	2013	1	1	5	5	-0,40119125	75949,2302	-0,51156047	1,67790257
2456293,75	2013	1	1	6	6	-0,40113359	75949,492	-0,31703793	1,83342651
2456293,792	2013	1	1	7	7	-0,40107577	75949,7537	-0,13047685	1,98990103
2456293,833	2013	1	1	8	8	-0,40101756	75950,0154	0,04304559	2,15729724
2456293,875	2013	1	1	9	9	-0,40095875	75950,2771	0,19714838	2,34394104
2456293,917	2013	1	1	10	10	-0,40089916	75950,5388	0,32362804	2,55627291
2456293,958	2013	1	1	11	11	-0,40083862	75950,8006	0,4127367	2,79631881

Tabla 5. Datos de posición del Sol.

6.6. Edificios singulares

La Infraestructura de Datos Espaciales Comunidad de Madrid (IDEM) dispone de datos relativos a delimitaciones territoriales (municipios, núcleos urbanos, secciones censales o áreas de salud) y puntos de interés (administración pública, centros educativos, turismo, transporte, etc.).

Partiendo de los datos proporcionados por la IDEM y el mapa turístico de Miraflores de la Sierra, se ha generado una capa de puntos con la distribución de monumentos y todos aquellos edificios localizados en el término municipal que por su antigüedad o características singulares no son apropiados para la instalación de sistemas fotovoltaicos.



Fuente: IDEM.

Figura 20. Edificios singulares de Miraflores de la Sierra.

7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

7.1. Situación

Miraflores de la Sierra es un municipio de la provincia de Madrid ubicado en la comarca de la Cuenca Alta del Manzanares a 49 km al norte de Madrid. Su altura máxima es el pico de La Najarra (2.120 m.) en la Sierra de Guadarrama y limita con los municipios de Rascafría y Soto del Real. Miraflores de la Sierra tiene una superficie de 56,66 km² y se localiza a latitud 40° 48' 50" N y longitud 30° 45'55"O.

El municipio está rodeado de vegetación destacando el bosque de pino silvestre y las formaciones de melojares como las especies más representativas en la región. En las zonas bajas donde las pendientes van disminuyendo, la encina es la especie dominante, apareciendo también pastizales típicos de entornos con usos ganaderos.

El núcleo urbano se sitúa a 1.145 m de altura en la vertiente sur del Pico de la Pala y la Sierra de la Morcuera. La mayoría del mismo está construido entre los 1.000 y 1.200 m con una inclinación aproximada del terreno del 20,89%.

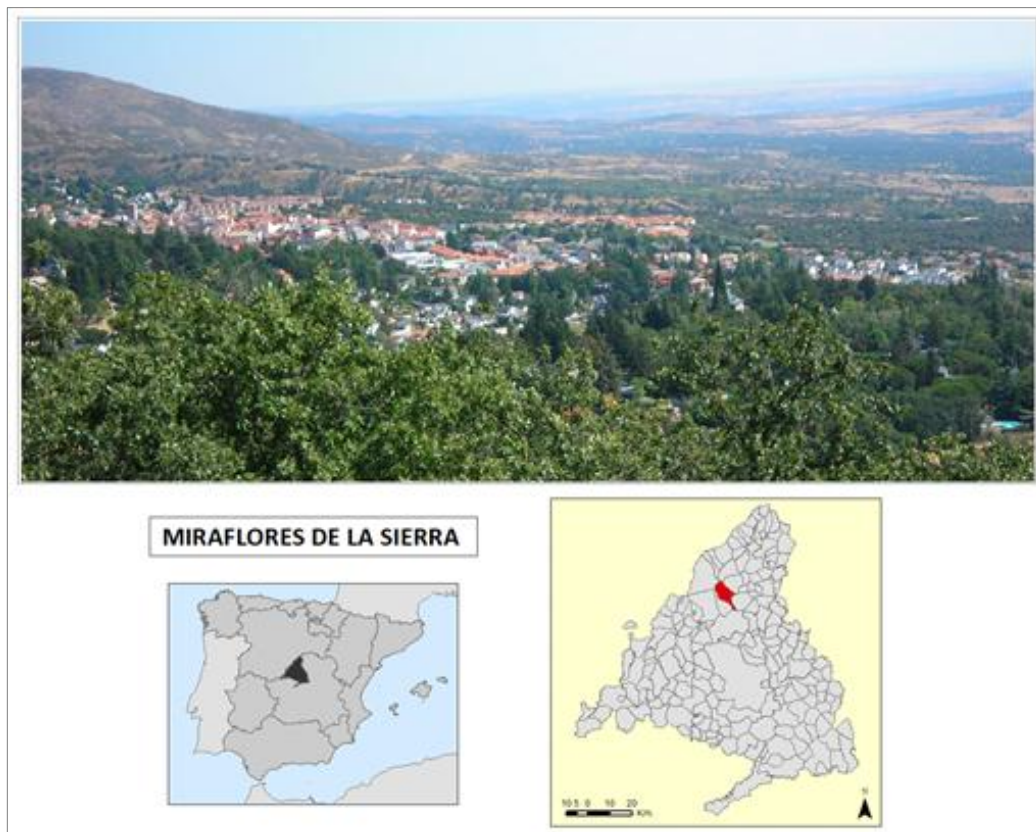


Figura 21. Situación del término municipal de Miraflores de la Sierra.

7.2. Clima

El clima en Miraflores de la Sierra presenta elementos de las áreas cercanas a la montaña al tratarse de una zona formada por un valle cerrado por el norte. La temperatura media anual es de 10,90 °C y la precipitación de 686 mm⁽¹⁴⁾.

Durante el verano el clima es suave, siendo en estos meses más cálidos la temperatura media máxima de 29,90 °C. Sin embargo, en los meses de invierno la temperatura media alcanza -1,20 °C. Esta zona dispone de aproximadamente 2.238 horas de Sol al año.

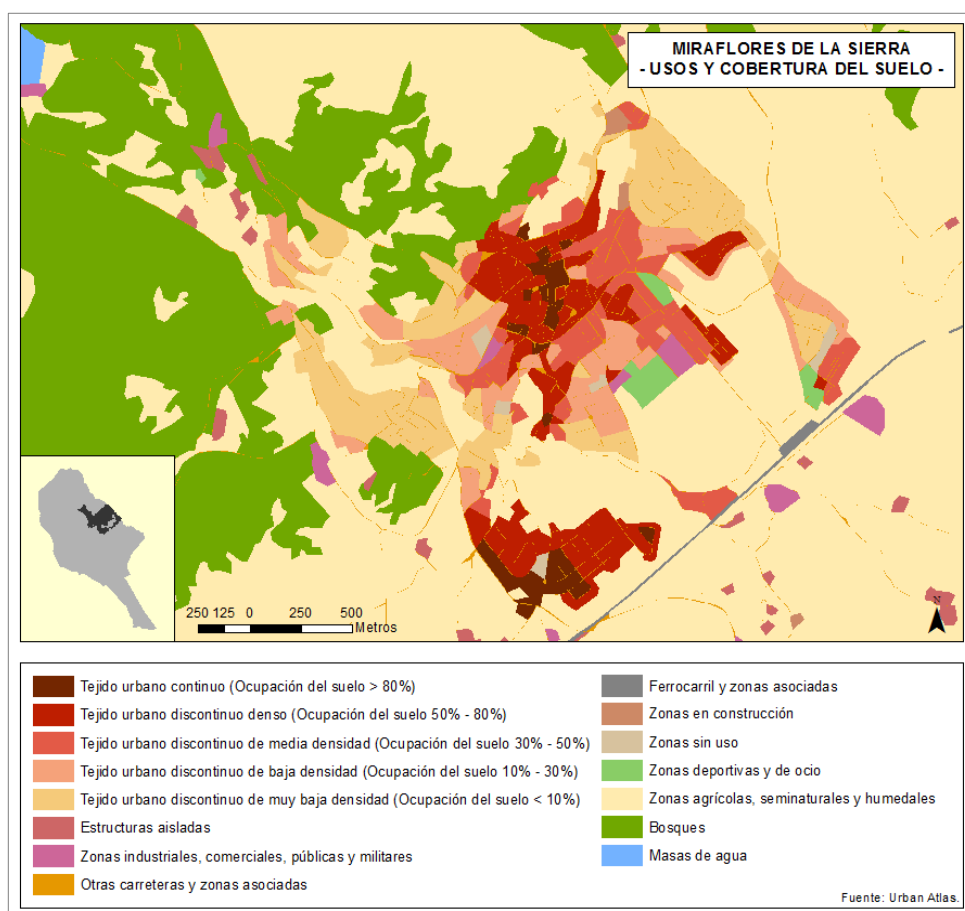
7.3. Estructura urbana

La actividad económica en Miraflores de la Sierra ha evolucionado en los últimos años hacia el sector servicios, se trata de una zona eminentemente residencial aunque todavía los usos ganaderos siguen estando presentes en la comarca.

⁽¹⁴⁾ Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

El municipio cuenta con 5.979 habitantes (INE, 2012) y una densidad de población de 105,53 hab/km². La población aumenta considerablemente durante los meses de verano al tratarse de un municipio con un 65% de viviendas de segunda residencia.

La configuración del entorno urbano varía dependiendo de la distribución de las viviendas, su estructura y también su antigüedad. En Miraflores de la Sierra, como es habitual en la mayoría de los núcleos urbanos, la zona centro suele ser un área de gran concentración de edificios y con una distribución de manzanas no demasiado homogénea que adquiere una estructura más ordenada y con menor densidad de viviendas en las zonas que han sido urbanizadas posteriormente.



Mapa 1. Usos y cobertura del suelo. Núcleo urbano de Miraflores de la Sierra⁽¹⁵⁾.

Aunque el mayor potencial fotovoltaico se puede obtener de los grandes edificios (industriales, bloques y equipamientos) al disponer de mayor superficie de tejados libre para instalaciones solares, el municipio se caracteriza por la presencia de viviendas unifamiliares individuales que configuran un tejido urbano principalmente de media y baja densidad con el 70% del suelo ocupado.

⁽¹⁵⁾ Urban Atlas: La Agencia Europea del Medio Ambiente dispone de mapas sobre usos y ocupación del suelo de zonas urbanas con más de 100.000 habitantes y sus alrededores. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>.

TEJIDO URBANO	OCUPACIÓN DEL SUELO (%)	SUPERFICIE (ha)	SUPERFICIE (%)
Continuo	> 80	10,66	5,68
Discontinuo denso	50 - 80	44,64	23,82
Discontinuo de media densidad	30 - 50	31,60	16,86
Baja densidad	10 - 30	38,38	20,47
Muy baja densidad	< 10	62,19	33,17

Fuente: Urban Atlas.

Tabla 6. Distribución del tejido urbano.

Un elemento a considerar en las zonas de tejido urbano de muy baja densidad es la presencia de numerosas viviendas individuales rodeadas de vegetación. Los tejados pueden estar cubiertos por los árboles cercanos que en ocasiones llegan a tener una altura superior.

En el municipio predominan, en la mayoría de las edificaciones, los tipos de tejados inclinados con dos vertientes. La presencia de cubiertas planas es escasa y sólo se observa este tipo de morfología en contados edificios.

8. METODOLOGÍA

El principal propósito de esta metodología es desarrollar un modelo con ArcGis que permita evaluar la localización óptima de instalaciones fotovoltaicas y la producción de energía eléctrica en una zona urbana. Aunque se pueden situar los paneles fotovoltaicos tanto en los tejados como en las fachadas de los edificios, en este trabajo sólo se va a analizar la posibilidad de instalaciones en los tejados.

El procedimiento se realizará utilizando dos programas distintos VRMesh V7.6 Studio y ArGis 10.1 de ESRI, basándose en un modelo tridimensional de la zona generado a partir de una nube de puntos de datos LIDAR.

Previamente se procede a la selección la zona de Miraflores de la Sierra sobre la que se aplicará el modelo y se recopila la información necesaria. Para obtener la información se consultan los diferentes servicios ya descritos dónde se pueden encontrar los datos de la zona relativos a la distribución de las edificaciones en zonas urbanas y la radiación solar.

El primer paso antes de realizar el análisis consiste en depurar la nube de puntos LIDAR y clasificarla extrayendo la vegetación, la distribución de los edificios, el terreno y todos aquellos elementos necesarios en el estudio.

Una vez editados los datos LIDAR se crear un modelo digital de superficie (MDS) de la zona urbana. Este tipo de datos han sido la base de diferentes trabajos anteriores (Chaves y Bahill, 2010; Brito et al., 2012; Nguyen et al., 2012; Gooding et al., 2013) debido a que permiten utilizar tanto la superficie del terreno como la forma de los edificios y el

arbolado. A partir de este modelo posteriormente se determinará la superficie de tejados, evaluará la radiación solar y consiguientemente la potencia instalada y la energía.

Para el cálculo de la superficie disponible de tejados donde ubicar módulos fotovoltaicos, hay que establecer los criterios que determinan cuales son las localizaciones adecuadas. En algunos trabajos sólo han tenido en cuenta la superficie horizontal del tejado sin considerar su forma (Brito et al., 2012), pero si se quiere obtener una mayor precisión de los resultados hay que considerar criterios como la pendiente y orientación (Chaves y Bahill, 2010; Gooding et al., 2013), sin descartar el efecto de las sombras.

Después de definir los criterios, la determinación de la superficie de tejados se llevará a cabo mediante un análisis multicriterio booleano con las características que deben cumplir todos los emplazamientos.

Con respecto a la estimación de la radiación solar existe la posibilidad de utilizar bases de datos climáticos existentes como Adrase y PVGIS. Sin embargo, en este caso se va a generar un mapa con las herramientas de radiación solar que se encuentran en ArcGis utilizando el MDS (Chaves y Bahill, 2010; Brito et al., 2012).

Los últimos cálculos que se realizan son el potencial fotovoltaico instalado y la determinación de la energía eléctrica producida anualmente. En el mercado existen diferentes tipos de módulos fotovoltaicos, dependiendo del modelo escogido los resultados serán diferentes debido a que la eficiencia no es la misma para todos ellos.

Finalmente se agrupan todos los resultados obtenidos para los edificios de la zona. De esta forma cada uno de ellos tendrá asignada información relativa a la superficie de tejados útil para sistemas fotovoltaicos, la potencia instalada y la energía producida según el tipo de módulos que se deseen instalar.

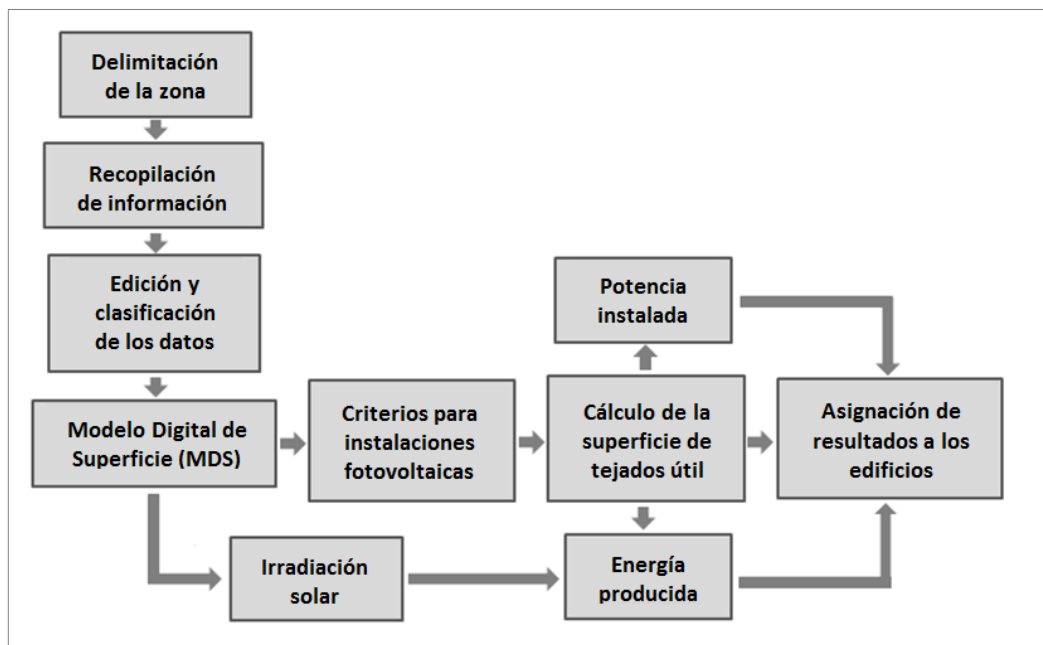
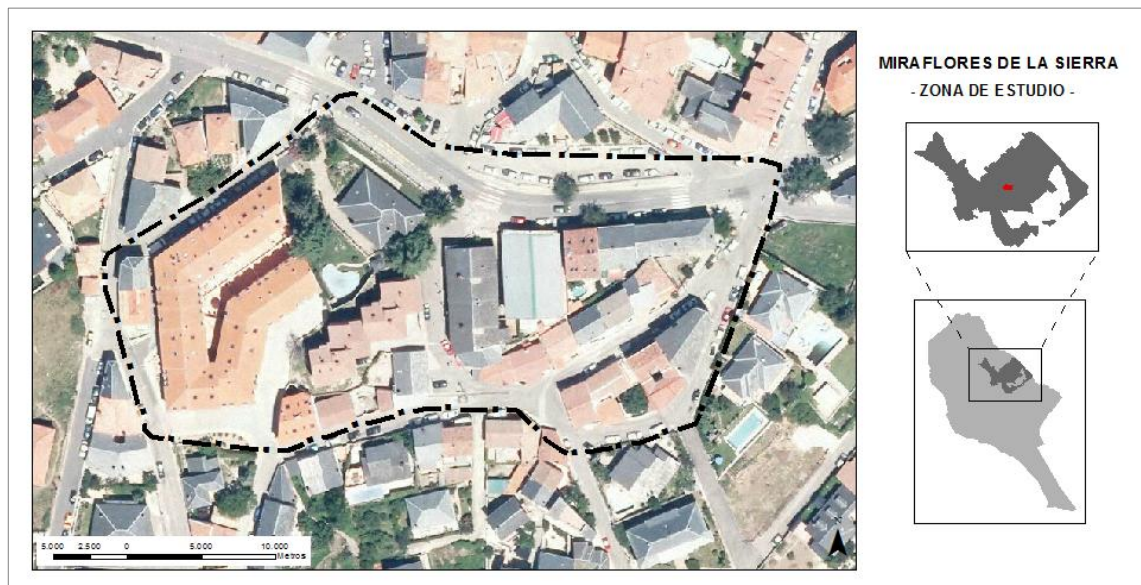


Figura 22. Pasos del procedimiento de trabajo.

8.1. Selección de la zona de estudio

En Miraflores de la Sierra se ha delimitado un área de aproximadamente 13.000 m² como muestra para realizar el análisis (latitud 40° 48' 36" N y longitud 03° 46' 12" O). Esta zona está situada en el centro de casco urbano y está constituida por varias manzanas de pequeño tamaño. Las edificaciones que se localizan en la zona presentan entre 2 y 4 plantas con tejados inclinados en todos los casos.



Mapa 2. Delimitación de la zona la zona de estudio.

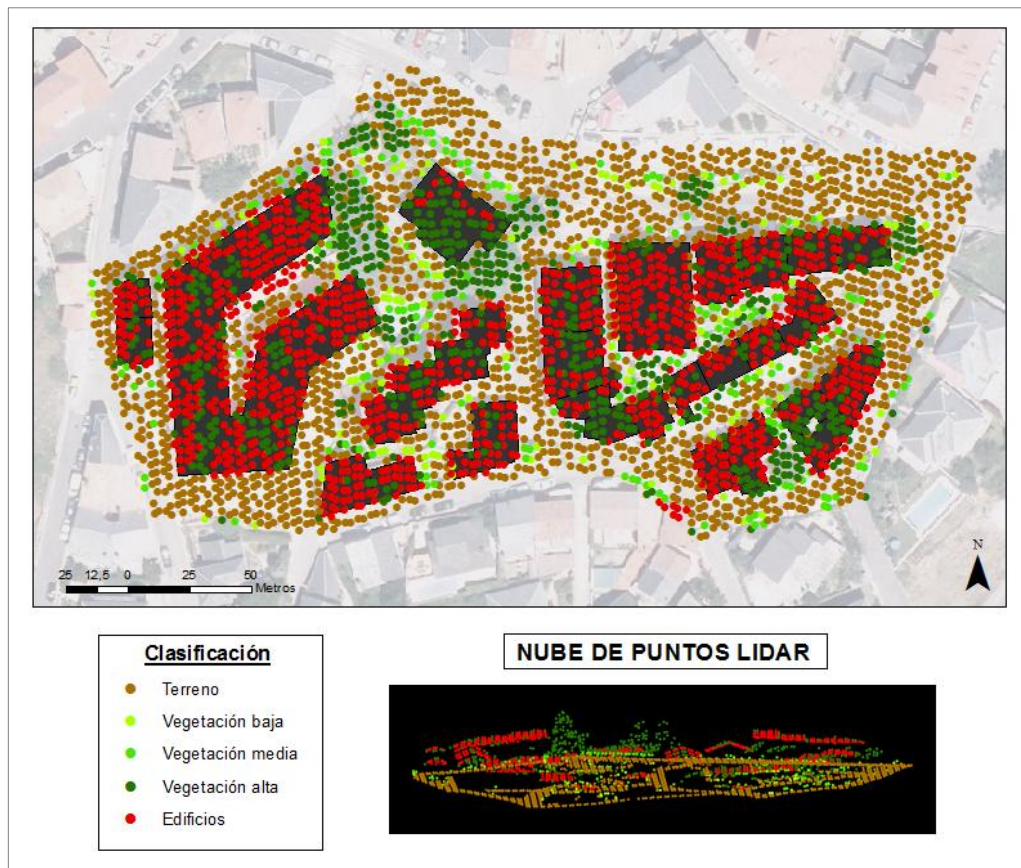
8.2. Datos de partida

En el desarrollo del procedimiento serán necesarias las siguientes capas de información:

- Nube de puntos LIDAR.
- Capa de polígonos con la delimitación de los edificios.
- Capa de puntuales con la distribución de los edificios singulares y monumentos.
- Ortofotografía del PNOA.
- Tabla con los datos de la posición del Sol.

8.3. Procesado de la nube de puntos LIDAR

La nube de puntos LIDAR presenta una clasificación automática previa en la que se puede observar que no todos los elementos están clasificados adecuadamente. Por ejemplo, en los tejados de los edificios hay zonas definidas como vegetación alta. Por este motivo, primero se procede a clasificar de nuevo los puntos para definir lo más exactamente posible la delimitación de los edificios.



Mapa 3. Clasificación previa de la nube de puntos LIDAR.

El tratamiento de los datos LIDAR se realizará con el programa 'VRMesh V7.6 Studio' que permite clasificar automáticamente nubes de puntos y además dispone de diferentes herramientas para realizar cambios en aquellas zonas donde la clasificación no ha resultado lo suficientemente precisa. El procedimiento que se sigue con este programa consiste en clasificar los elementos básicos que constituyen la nube de puntos y a continuación, editarla para reparar los posibles errores.

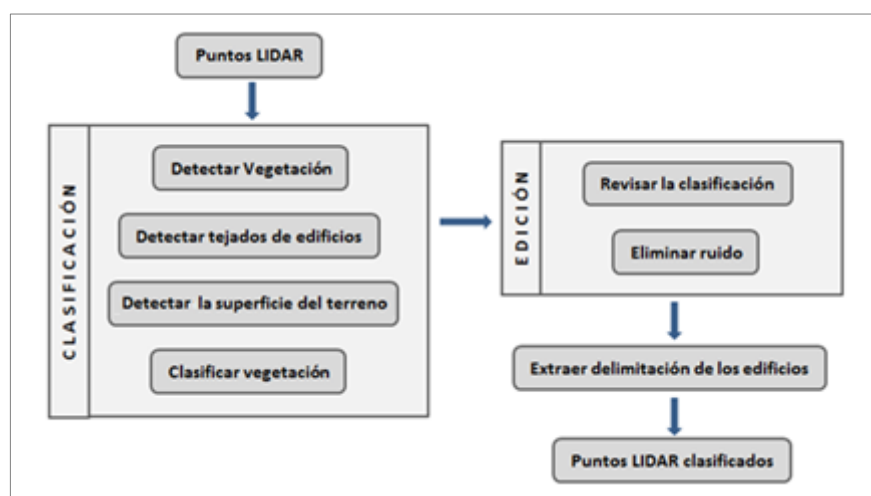


Figura 23. Procedimiento de clasificación y edición de los datos LIDAR.

8.3.1. Clasificación

El proceso de clasificación consiste en detectar primero la vegetación, después los tejados de los edificios y los puntos del terreno, para finalizar con la clasificación de la vegetación en sus diferentes tipos. Todas las herramientas para la clasificación están agrupadas en 'Survey Wizard' y se tiene que ejecutar en un orden determinado, para poder clasificar los tejados de los edificios y los puntos del suelo hay que detectar previamente la vegetación.

8.3.1.1. Detección de la vegetación

El programa determina la presencia de vegetación teniendo en cuenta si la rugosidad es superior a un valor determinado. Generalmente para zonas urbanas el valor de rugosidad suele ser aproximadamente de 0,20 a 0,30 y en zonas de montaña puede alcanzar valores de 0,60.

Además de la rugosidad, se define el número de puntos necesarios para que una zona se clasifique como vegetación. En este caso, en las áreas con menos de 50 puntos se considera la presencia de vegetación.

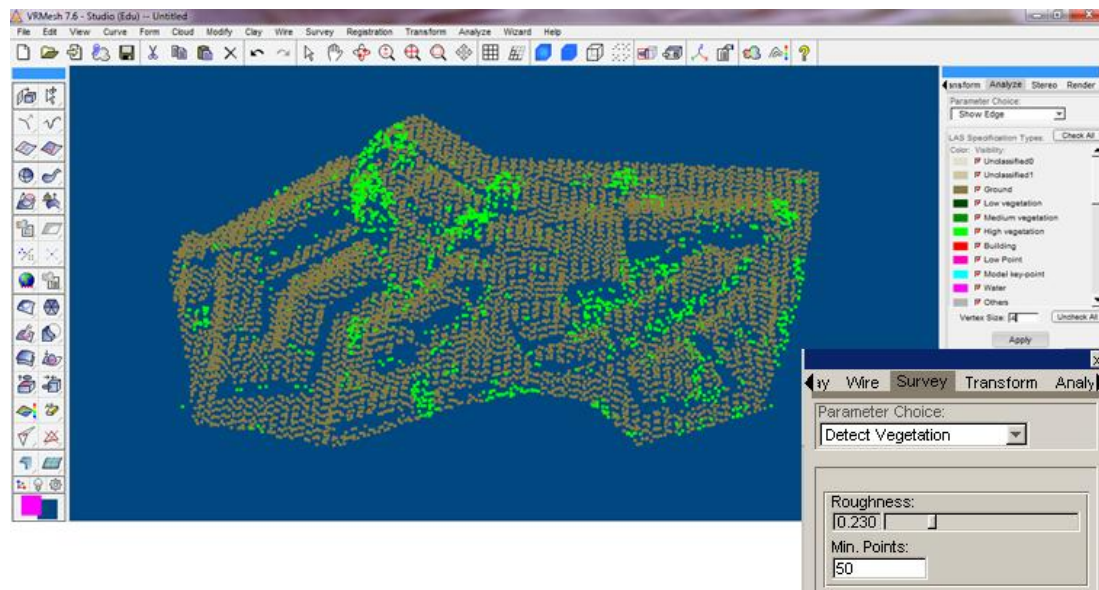


Figura 24. Detección de la vegetación.

8.3.1.2. Detección de los edificios

En este paso se detectan los puntos que representan los tejados de los edificios. Hay que definir un valor máximo de pendiente para los tejados (normalmente de 50 a 85), la altura mínima de los edificios y el número de puntos (mínimo/máximo) necesarios para configurarlo. Una vez identificados los edificios también se puede obtener la delimitación su contorno siempre que el número de puntos sea suficiente.

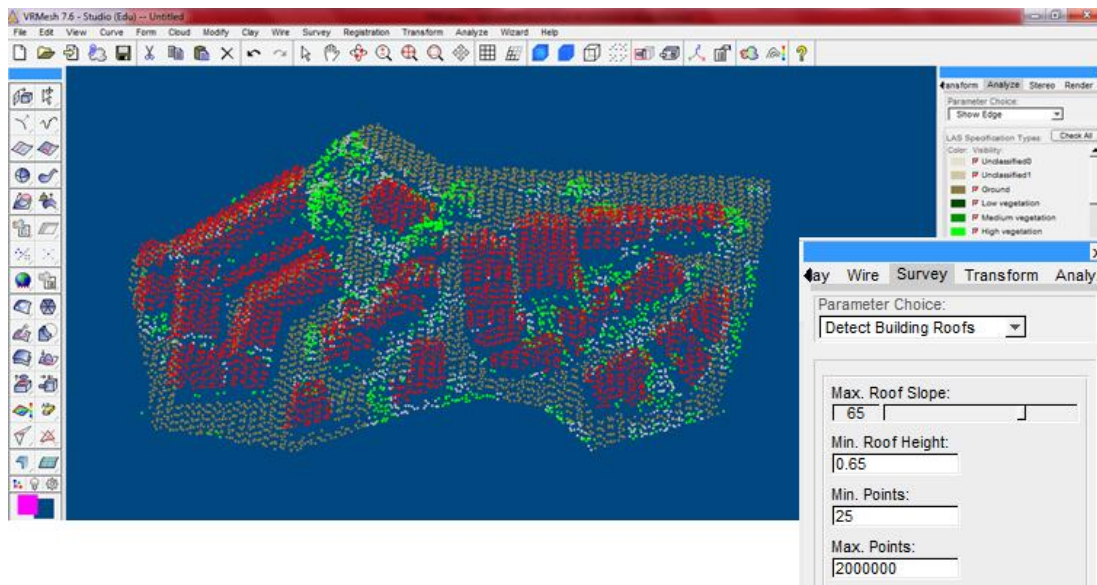


Figura 25. Detección de tejados de los edificios.

8.3.1.3. Superficie del terreno

‘Clean Ground Points’ clasifica los puntos del suelo eliminando aquellos elementos flotantes que no son necesarios para definirlo. Presenta dos alternativas de clasificación que representan a zonas urbanas y zonas de montaña.

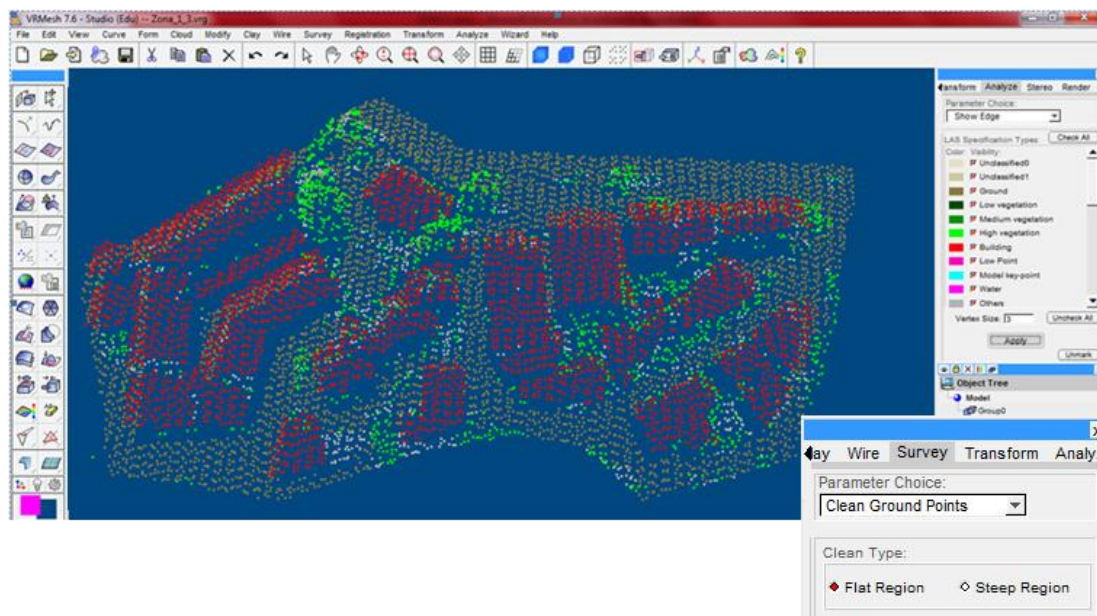


Figura 26. Detección de puntos del suelo.

8.3.1.4. Clasificación de la vegetación

Dependiendo de la altura la vegetación se la clasifica en baja, media y alta. Se determinan dos valores de altura, uno por debajo del cual se clasificará la vegetación

baja y otro valor que designará todos aquellos puntos que lo superen como correspondientes a la vegetación alta. Los valores utilizados para clasificar dependerán de las características de la vegetación de cada zona, en este caso se han asignado valores de 0,25 y 6 m respectivamente.

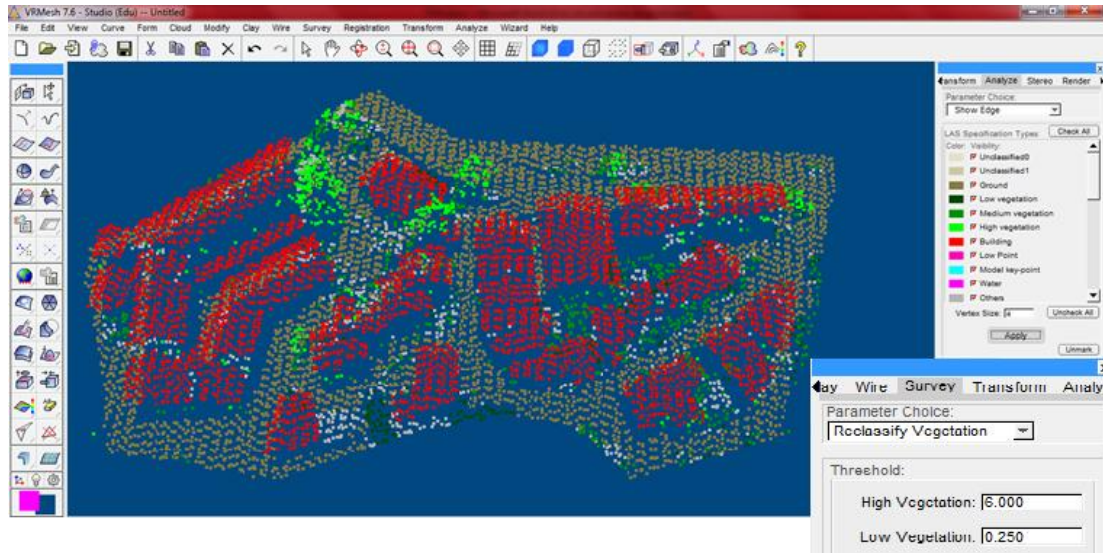


Figura 27. Clasificación de la vegetación.

8.3.2. Edición

Después de la clasificación automática se procede a su revisión para comprobar que el proceso se ha realizado correctamente. VRMesh además de disponer de herramientas que proporcionan varias vistas de una zona, permite girarlas para identificar los diferentes elementos. Sin embargo, en esta etapa de revisión de la clasificación aparecen algunas zonas poco definidas a consecuencia de la densidad de los puntos disponible, siendo necesario utilizar ortoimágenes e incluso 'Street View' de Google Maps para localizar algunos objetos.

Posteriormente se depura la nube de puntos con las herramientas del menú 'Cloud' que realizan diferentes funciones como eliminar el ruido de los datos y aquellos puntos que sean redundantes. Cuando la nube de puntos es muy densa se puede reducir en una determinada proporción el número de puntos que la constituyen sin perjudicar la precisión de los resultados.

8.3.2.1. Revisión de la clasificación

Al comprobar la clasificación, generalmente se localizan errores en las zonas donde confluyen los edificios con las áreas arboladas o cualquier otro objeto conflictivo que se sitúa cerca de ellos. Todos estos elementos que no se han clasificado correctamente se van seleccionando y modificando individualmente.

Cuando los tejados de los edificios han sido definidos erróneamente se vuelven a clasificar con 'Redetect Building Roofs' que detecta edificios que han sido asignados a otra clase como vegetación u otros. La búsqueda de edificios se puede realizar en una clase completa de un archivo o seleccionando una zona concreta. Para reclasificar se definen de nuevo parámetros de pendiente del tejado, altura y el número de puntos que delimitan los nuevos edificios.

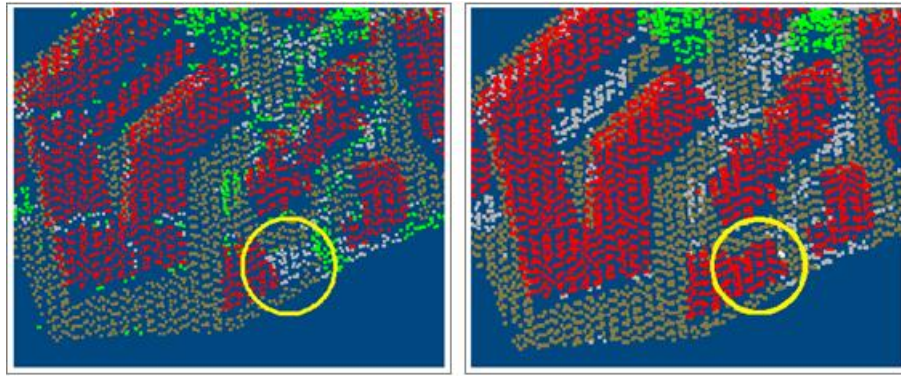


Figura 28. En la zona marcada el edificio que han sido clasificados como 'otros' se reasigna a su clase.

Se revisan algunas zonas utilizando diferentes vistas en alzado para determinar mejor cuales son los puntos que corresponden a los tejados, vegetación o al suelo. Cada tipo de elemento se selecciona para asignarles la clasificación que les corresponda.

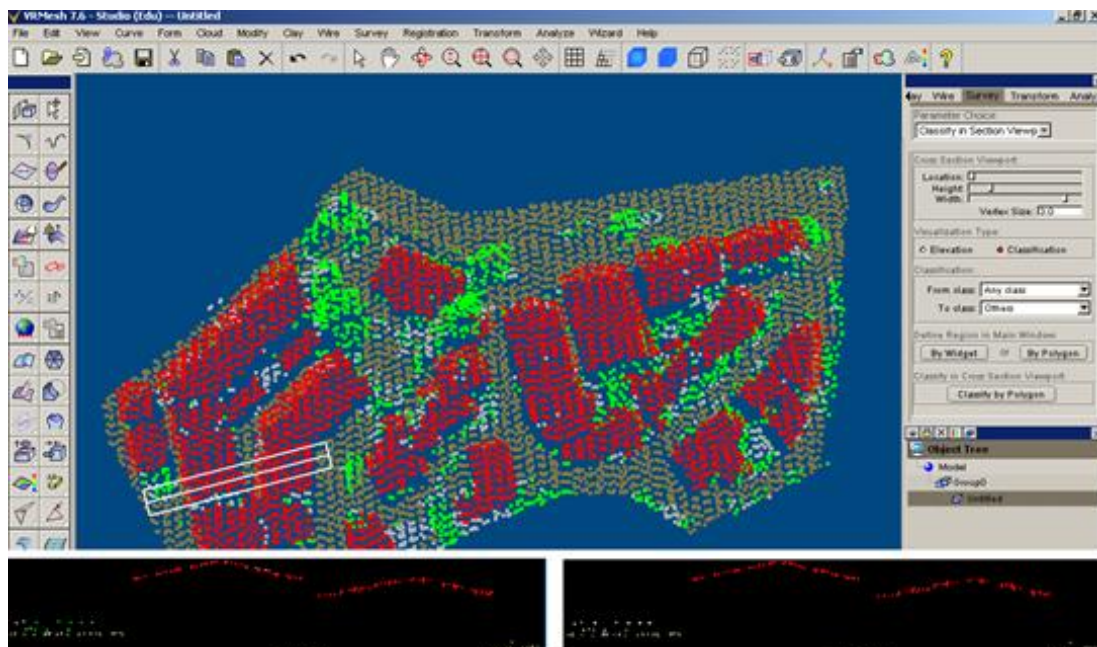


Figura 29. Reclasificar utilizando perfiles.

Cuando se ha realizado la clasificación automática de la nube de puntos, a todos aquellos elementos presentes en las zonas urbanas que no corresponden a las clases principales

de vegetación, tejados de edificios o puntos de suelos se les ha asignado la clase 'Otros'. Esta clase se utiliza también para clasificar determinadas zonas en la estructura de los edificios que no corresponden a las zonas de los tejados y elementos urbanos que la definición de la nube de puntos no permite asignar adecuadamente.

Algunos de estos elementos presentes en las zonas urbanas son los coches u otros objetos de diversos tamaños en las calles. Para eliminarlos se los puede asignar a una capa determinada (por ejemplo 'Sin clasificar') y después suprimirlos. No obstante, otra alternativa para todos aquellos elementos sin clasificar es modificar su altura para interpolarlos como puntos de suelo aplicándoles cierto grado de suavizado (Interpolate Points to Ground).

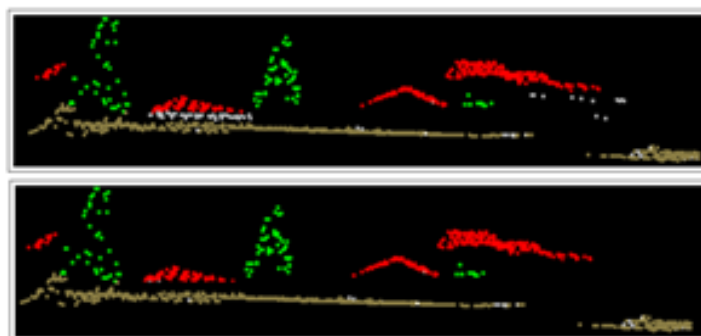


Figura 30. Interpolación a puntos del suelo.

8.3.2.2. Eliminación del ruido

En este caso principalmente es necesario suavizar los planos que definen las vertientes de los tejados. Existen diferentes herramientas para depurar la nube de puntos. La eliminación de puntos redundantes borra aquellos puntos que son innecesarios teniendo en cuenta una distancia mínima requerida entre los mismos. Cuando la distancia entre dos puntos es menor que la distancia definida, se elimina uno de ellos.

Sin embargo, por las características del archivo LIDAR con el que se está trabajando, se utilizará sólo la eliminación del ruido. Esta herramienta disminuye el número de puntos siempre que se preserve la forma de las aristas y esquinas para mantener todo lo posible la delimitación de las superficies.

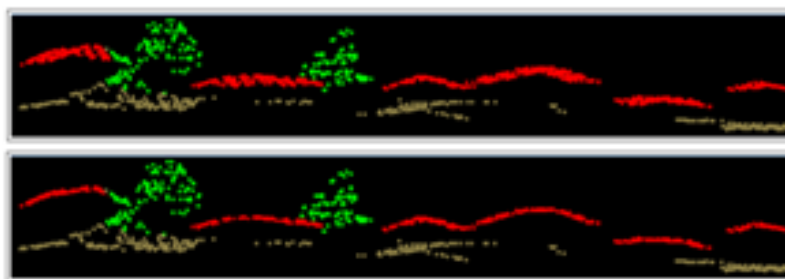


Figura 31. Eliminación del ruido en la nube de puntos.

8.3.3. Delimitación de los edificios

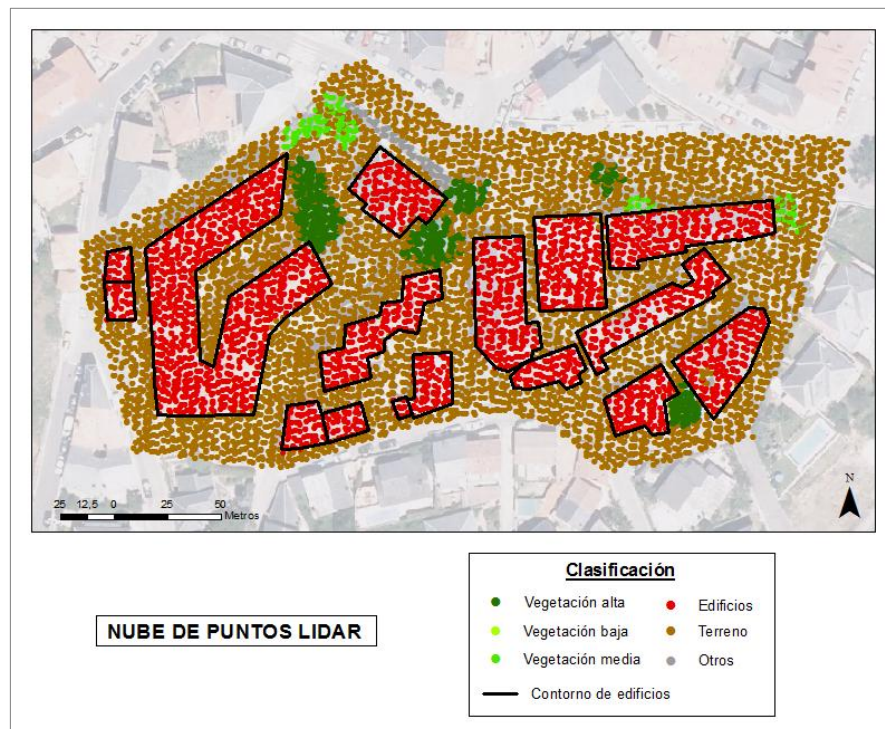
Utilizando los puntos clasificados anteriormente como edificios se puede generar su contorno con 'Extract Building Footprints'. Los parámetros necesarios en la delimitación de los edificios son el número de puntos que lo constituyen y el área mínima que se considera para definir un edificio.



Figura 32. Contorno de los edificios.

8.3.4. Nube de puntos LIDAR clasificada

La clasificación obtenida de los puntos LIDAR en la zona seleccionada es la siguiente:



Mapa 4. Clasificación de la nube de puntos LIDAR.

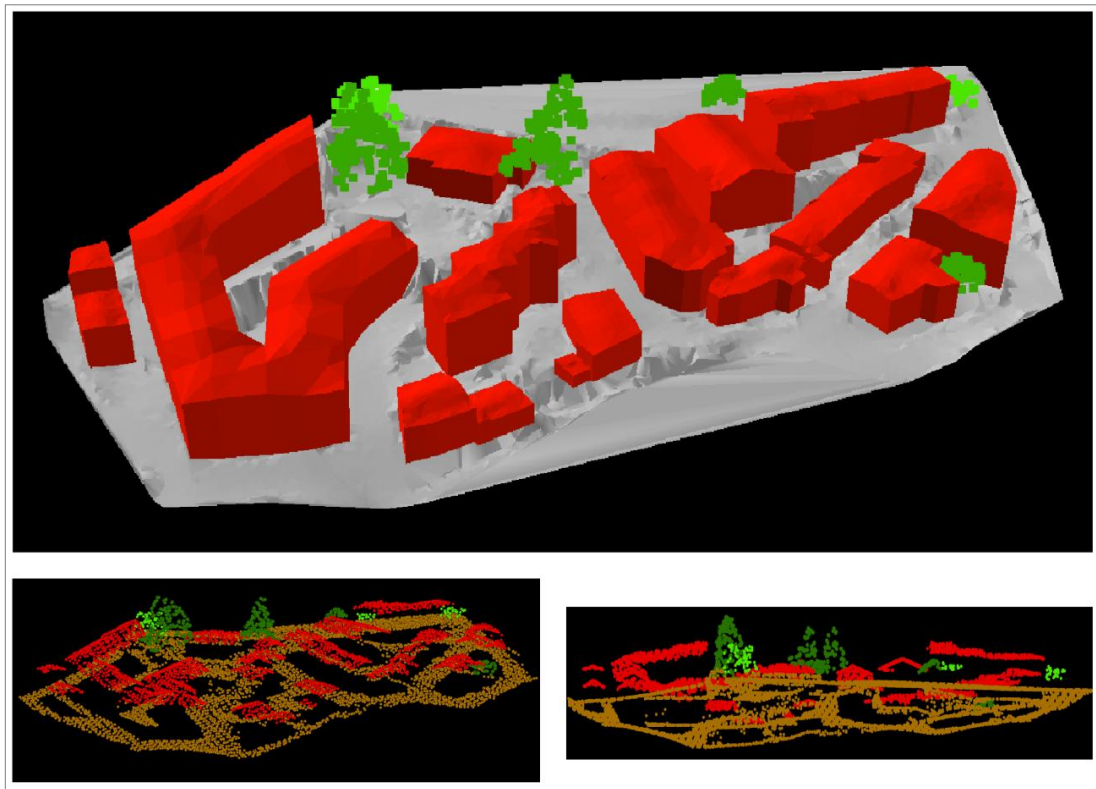


Figura 33. Vistas del área de estudio clasificada.

8.4. Modelo 3D de la zona urbana

Después de haber clasificado la nube de puntos, el análisis de los datos se llevará a cabo con ArcGis 10.1. En la determinación del potencial solar fotovoltaico es importante tener acceso a modelos urbanos en 3D donde la forma de los edificios es representada junto con la vegetación, calles y otras infraestructuras (Nguyen et al., 2012). Para calcular el Modelo digital de superficie (MDS), a partir de la nube de puntos LIDAR clasificada primero se crea un TIN (red irregular de triángulos) y posteriormente, se transforma el TIN en un ráster mediante una herramienta de conversión. En este caso se ha seleccionado el método de interpolación ‘vecino natural’ que aplica ponderaciones según los valores cercanos circundantes a un punto para interpolar el valor de las celdas, asegurando una superficie resultante suavizada pero respetando siempre la ubicación de los elementos de entrada.

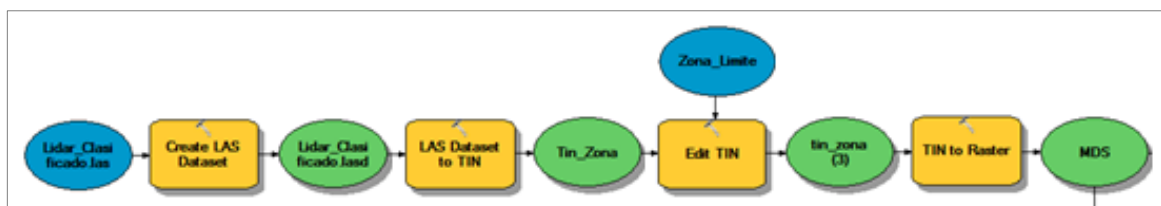
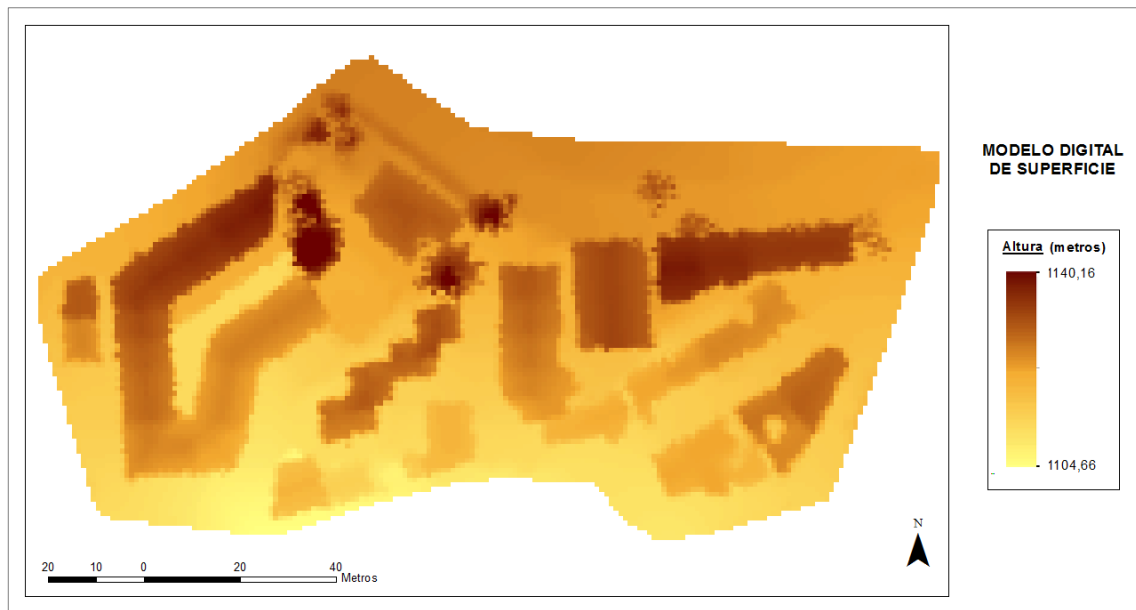


Figura 34. Modelo para la generación del MDS.

El MDS resultante es una capa ráster con un tamaño de celda de 1x1 m.



Mapa 5. Modelo digital de superficie.

8.5. Superficie de tejados disponible

Para el cálculo de la superficie disponible de tejados se llevará a cabo un análisis multicriterio booleano que permitirá determinar la superficie útil para instalaciones fotovoltaicas y descartará aquellas zonas inadecuadas.

En el análisis, primero se determinan las condiciones que deben cumplir cada uno de los factores (restricciones). En este proceso se asigna valor 1 cuando los factores cumplen la condiciones establecidas y valor 0 cuando no la cumplen, obteniéndose como resultados una serie de capas binarias que representan cada una de las restricciones. Posteriormente, se combinan las capas dando como resultado aquellas zonas que cumplen con todas los criterios definidos.

8.5.1. Criterios

Los criterios que se van a considerar en este caso son los siguientes:

- Pérdidas de energía ocasionadas por la inclinación y orientación de los tejados.
- Superficie de los tejados afectada por las sombras generadas por cualquier elemento circundante.
- Superficie de los tejados destinada al acceso a los módulos fotovoltaicos.
- Presencia de monumentos y edificios singulares.

Estos criterios se determinarán a partir del MDS calculado anteriormente. Utilizando las herramientas específicas para superficies de análisis espacial en ArcGis se pueden identificar los patrones que definen cada uno de los criterios.

8.5.1.1. Pérdidas por inclinación y orientación

El criterio establecido para las pérdidas de energía respecto a la inclinación y orientación de los módulos fotovoltaicos es el establecido en el ‘Documento Básico HE5’ del Código Técnico de la Edificación. En módulos superpuestos⁽¹⁶⁾ no deben superar el 20%.

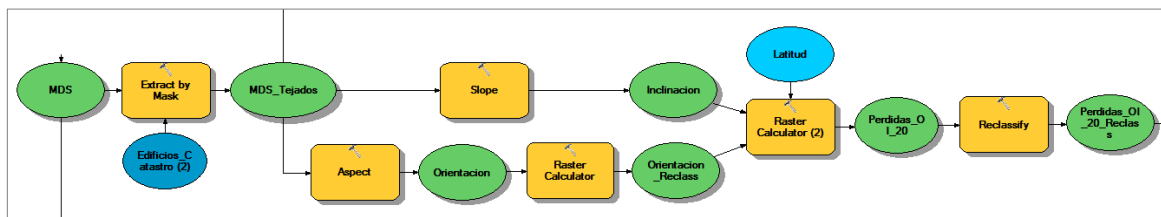


Figura 35. Modelo para el cálculo de las pérdidas por inclinación y orientación.

Previamente al cálculo de la inclinación y orientación de los tejados de los edificios se procede a extraer los mismos del MDS utilizando como máscara la capa de polígonos que delimitan los edificios proporcionada por Catastro.

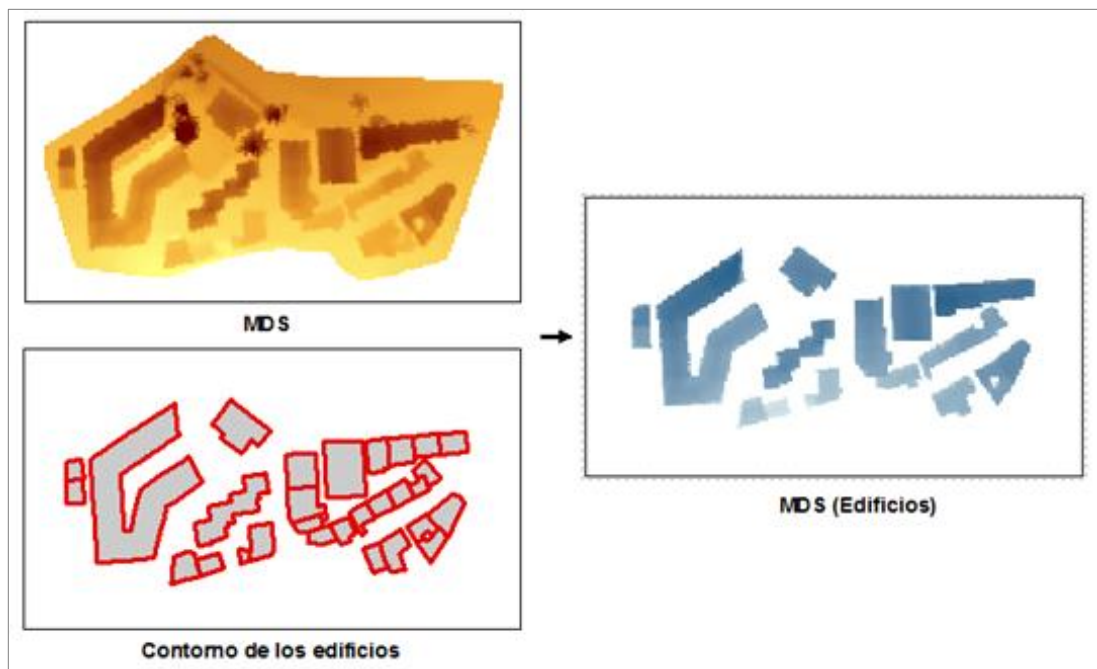


Figura 36. Delimitación de los edificios.

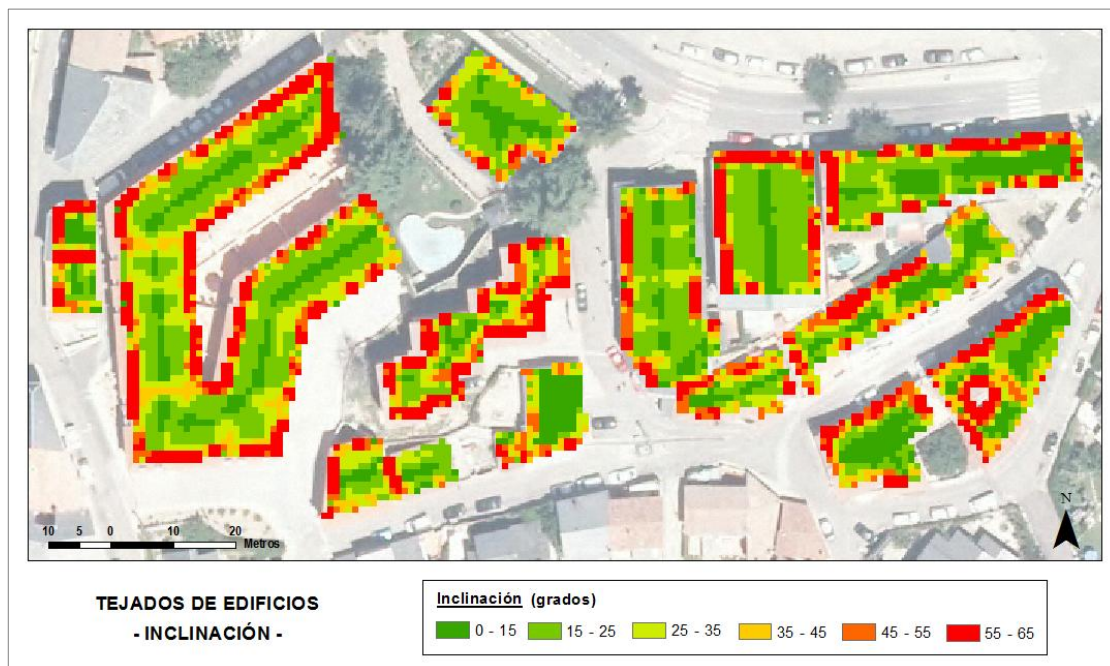
Respecto al contorno de los edificios se dispone de dos capas: Los límites generados con VRMesh en el apartado de clasificación de los datos LIDAR y los edificios proporcionados

⁽¹⁶⁾ Módulos situados paralelos a la envolvente del edificio.

por Catastro. Debido a la densidad de la nube de puntos, los contornos en algunas zonas no se ajustan adecuadamente a la forma de los mismos por lo que se ha escogido los edificios de Catastro.

8.5.1.1.1. Inclinación

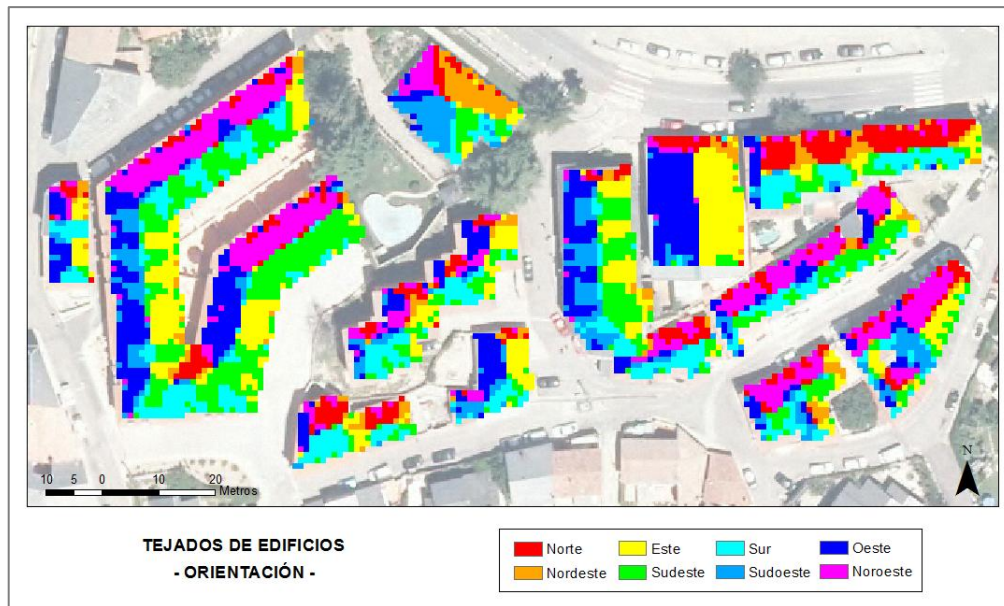
La inclinación de los tejados se calcula con el MDS de los edificios aplicando la herramienta para generar pendientes. Las unidades de medida utilizadas en el cálculo serán los grados y el rango de valores de las pendientes resultantes oscilará entre 0 y 90.



Mapa 6. Inclinación de los tejados.

8.5.1.1.2. Orientación

A partir del MDS de los edificios el cálculo de la posición de los tejados se realiza con la herramienta que determina la orientación. En esta herramienta, los valores de orientación obtenidos para los tejados que presentan una cierta inclinación se expresan en grados de 0 a 359,9 (medidos siempre desde el norte en sentido horario) y a los tejados planos se les asigna valor -1. Sin embargo, para el cálculo de las pérdidas de energía los datos de orientación correspondientes a los tejados inclinados deben reclasificarse para que 0° se sitúen en el sur, tomando valores positivos hacia el oeste y valores negativos hacia el este.

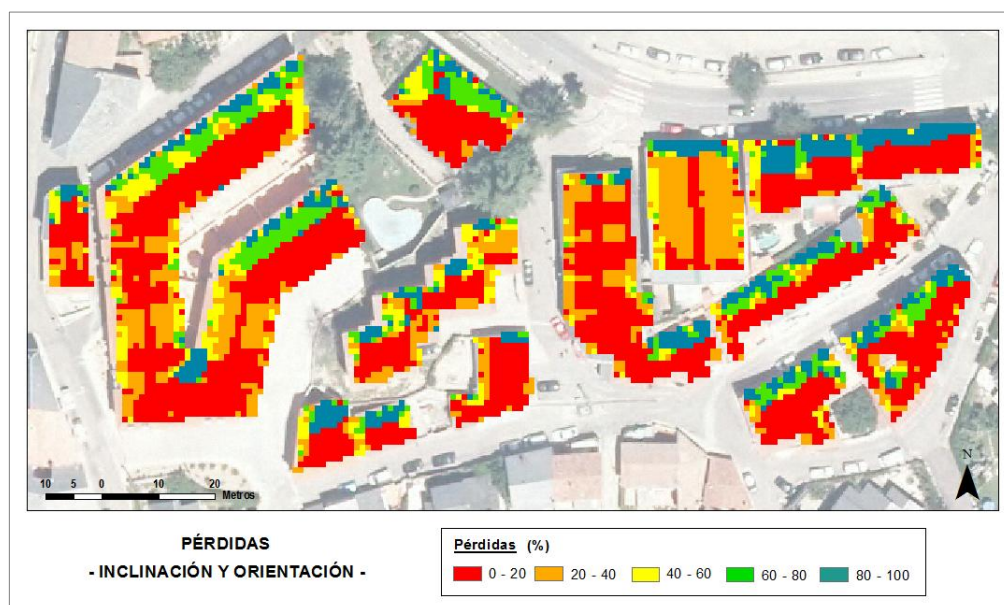


Mapa 7. Orientación de los tejados.

8.5.1.1.3. Cálculo de las pérdidas por inclinación y orientación

Después de calcular los valores de inclinación y orientación de los tejados se determinan las pérdidas según las fórmulas definidas por el CTE anteriormente citadas. Con la calculadora de ráster se puede generar la capa de pérdidas estableciendo una condición que seleccione la fórmula adecuada dependiendo de la inclinación de los tejados. La expresión utilizada es la siguiente (la latitud en la zona de estudio de $40,81^\circ$):

Con $(\text{Inclinación} \leq 15, 100 * (1.2 * \text{Exp}10(-4) * \text{Square}(\text{Inclinación} - \text{Latitud} + 10)), 100 * (1.2 * \text{Exp}10(-4) * \text{Square}(\text{Inclinación} - \text{Latitud} + 10) + 3.5 * \text{Exp}10(-5) * \text{Square}(\text{Orientación}))$)



Mapa 8. Pérdidas por inclinación y orientación.

Por último, la capa resultante se obtiene reclasificando las pérdidas por inclinación y orientación asignado valor 1 a las celdas correspondientes a las pérdidas menores o iguales al 20%.

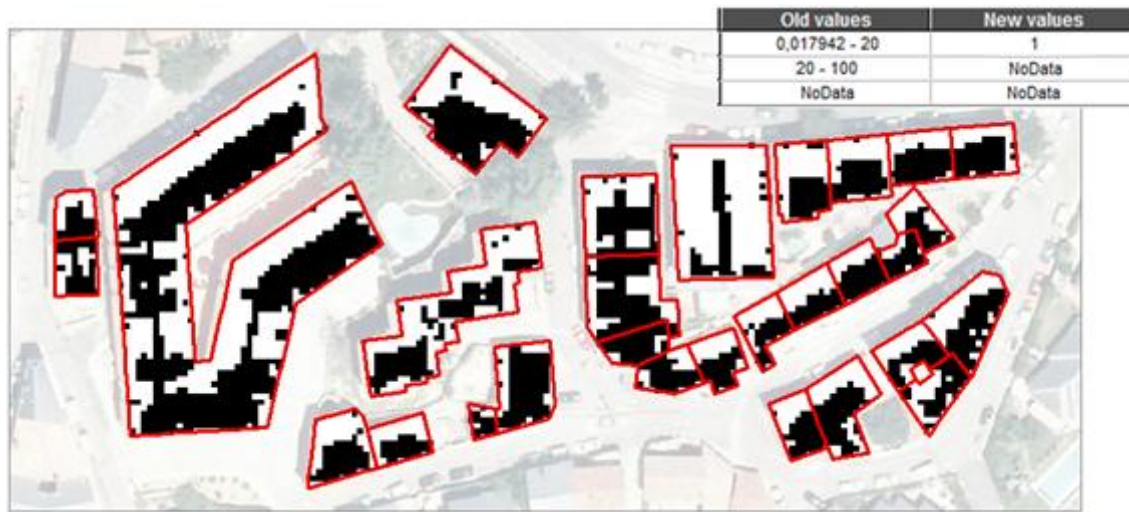


Figura 37. Pérdidas por inclinación y orientación inferiores al 20%.

8.5.1.2. Sombreado

En el análisis del sombreado hay que considerar diferentes elementos como la topografía del terreno, los tejados y edificaciones adyacentes, zonas arboladas, muros o cualquier otro elemento circundante presente. Las sombras son un factor importante en el diseño de instalaciones fotovoltaicas. Aunque los paneles solares pueden funcionar con radiación difusa, se debe evitar el sombreado principalmente en las horas de mayor insolación y aprovechar al máximo la producción de energía.

Para el cálculo de las sombras se utiliza la herramienta 'Hillshade' (La Genusa et al., 2011) que determina la iluminación de una zona a partir del modelo ráster de superficie teniendo en cuenta la posición del Sol y las sombras. Permite estimar si una zona está sombreada o no y las dimensiones de las sombras en un tiempo dado.

El criterio a considerar establece que de la superficie total disponible en el tejado se eliminan aquellas zonas afectadas por sombras en las cuatro horas centrales del día a lo largo de todo el año, suponiendo la hora solar verdadera (Amador, J.).

En este caso se va a calcular el mapa anual de sombras para la zona de estudio entre las 10 y 14 horas. Para ello, primero se generarán mapas de sombras de todos los días del año con un intervalo horario y después se combinan todas los mapas resultando un mapa total de sombras anual.

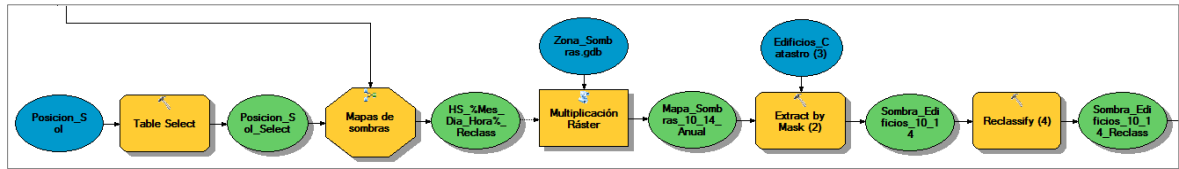


Figura 38. Modelo para la generación de sombras.

El proceso de generación del mapa de sombras consta de los siguientes pasos:

1. En el cálculo del sombreado se necesitan datos relativos a la situación del Sol que en esta herramienta están definidos por los ángulos de acimut y altura. Estos valores se obtienen de la tabla de datos de posición solar proporcionada por 'SoDa Service' con un intervalo de 1 hora correspondiente al año 2013. De la tabla de datos se seleccionan únicamente aquellos valores del periodo para el que se van a calcular las sombras (10 a 14 horas).

Posicion_Sol_Select								
	OBJECTID *	AÑO	MES	DIA	HORA	DIA DEL AÑO	ELEVACION grados	ACIMUT grados
	1	2013	1	1	10	1	18,542521	146,463649
	2	2013	1	1	11	1	23,648071	160,217266
	3	2013	1	1	12	1	26,074608	175,200621
	4	2013	1	1	13	1	25,509546	190,525257
	5	2013	1	1	14	1	22,02948	205,129254
	6	2013	1	2	10	2	18,57414	146,322641
	7	2013	1	2	11	2	23,704608	160,080367
	8	2013	1	2	12	2	26,156703	175,077495
	9	2013	1	2	13	2	25,614061	190,425585
	10	2013	1	2	14	2	22,150455	205,057503
	11	2013	1	3	10	3	18,61287	146,179056
	12	2013	1	3	11	3	23,768562	159,942271
	13	2013	1	3	12	3	26,246266	174,954903
	14	2013	1	3	13	3	25,72576	190,328262
	15	2013	1	3	14	3	22,278026	204,989644
	16	2013	1	4	10	4	18,658713	146,032985
	17	2013	1	4	11	4	23,839914	159,803064
	18	2013	1	4	12	4	26,343264	174,832929
	19	2013	1	4	13	4	25,84459	190,233374
	20	2013	1	4	14	4	22,412126	204,925757
	21	2013	1	5	10	5	18,711664	145,88452

Tabla 7. Tabla con los datos de la posición del Sol.

2. Para calcular todos los mapas de sombras se ha creado un submodelo 'Mapa de sombras' (Anexo VI). Utiliza un iterador de filas que recorre la tabla y extrae de cada fila los valores de acimut y altura de la posición del Sol para crear todos los mapas de sombras necesarios.

En las capas ráster generadas, los valores de sombra e iluminación resultantes van de 0 a 255 donde las zonas en sombra se corresponden con el valor 0. Como sólo nos interesan las áreas sombreadas y para facilitar las operaciones del cálculo del mapa total posterior, los valores de 1 a 255 de cada mapa se reclasifican como 1. En los mapas obtenidos el valor 0 representa las zonas afectadas por sombras y valor 1 las zonas sin sombra.

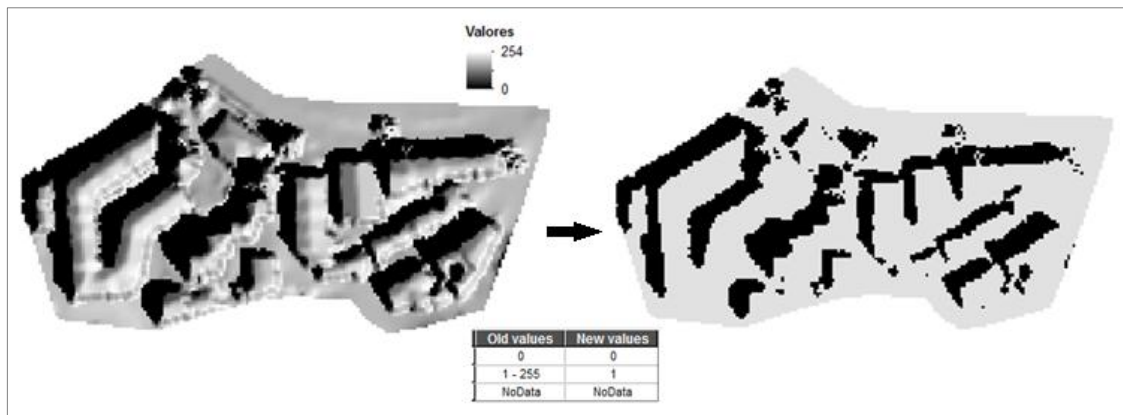


Figura 39. Ejemplo de generación del mapa de sombras (1 de Abril a las 10:00 h).

- Una vez generados los mapas individuales de sombras se multiplican dando como resultado el mapa total de sombras a lo largo de año. Para poder realizar esta operación se ha creado la herramienta 'Multiplicación Ráster' con la que mediante un iterador de ráster se recorre el espacio de trabajo seleccionado y multiplica todas las capas ráster que se indiquen (Anexo I).

En esta herramienta hay que indicar la geodatabase que contiene todas las capas a multiplicar y si es necesario, el nombre de las capas. Las sombras anuales resultantes son las siguientes:



Figura 40. Distribución anual de las sombras.

La posición del Sol, además de cambiar cada día a lo largo del año solar (por ejemplo, la altura del Sol es más baja en invierno y más alta en verano), es diferente según la situación geográfica desde donde se mida. A continuación se muestra cómo evoluciona el tamaño de las zonas cubierta por sombras en los diferentes meses del año.

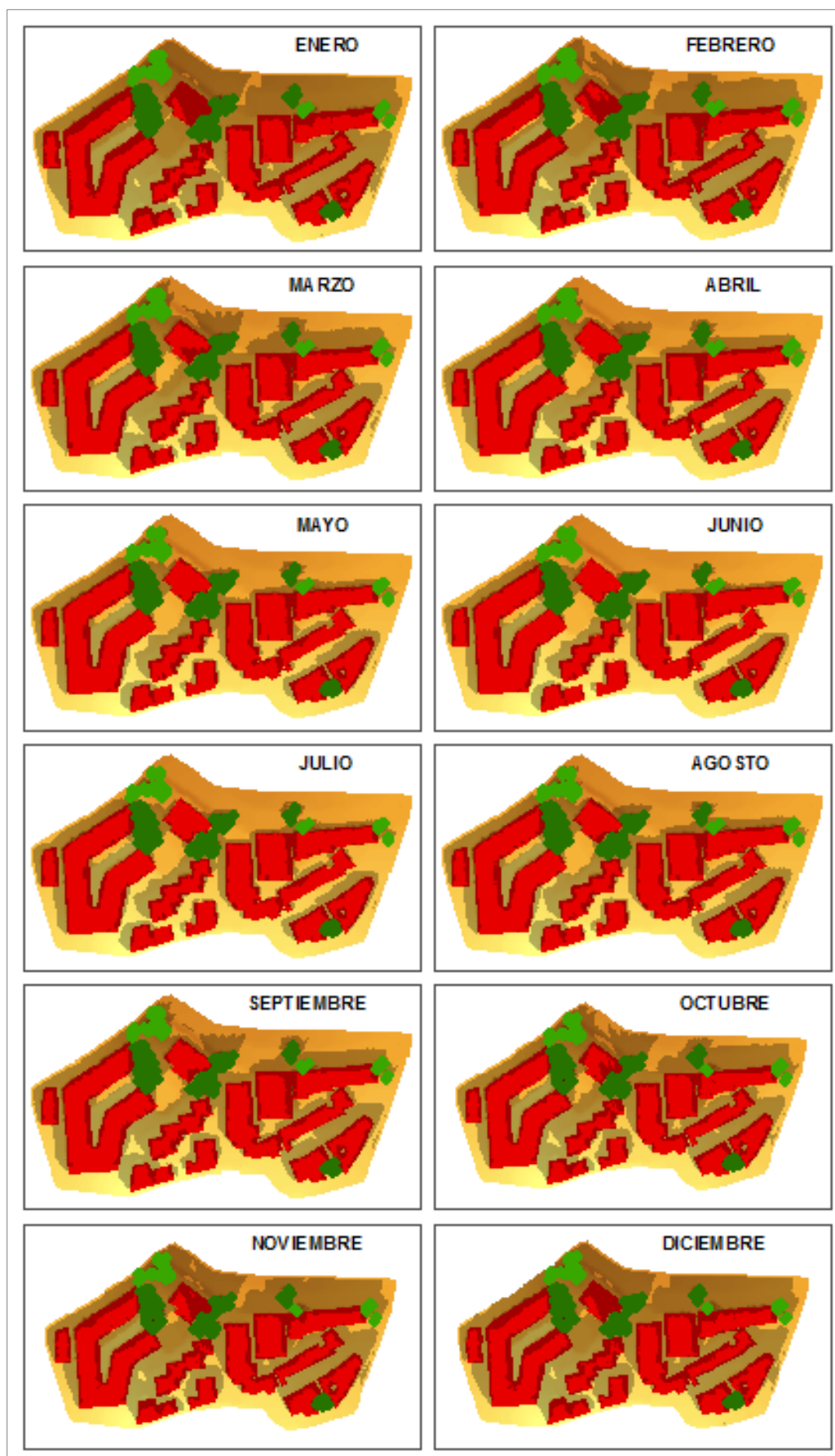


Figura 41. Distribución mensual de las sombras.

4. Finalmente se delimita la superficie de las sombras que sólo afectan a los edificios con la máscara de los polígonos de Catastro. El resultado es el mapa de sombras anuales en las cuatro horas centrales del día.



Mapa 9. Superficie de los edificios afectada por sombras.

8.5.1.3. Accesibilidad a los tejados

La accesibilidad a la zona de los tejados donde se sitúan los módulos también es un factor a considerar para establecer la superficie efectiva. Estas zonas principalmente deben facilitar el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos y el acceso para la extinción de incendios.

Con estas zonas se establecen unos requisitos que *“básicamente se pueden resumir en dos caminos de acceso de 1 m de ancho en tejados inclinados y una banda perimetral de al menos 1 m en cubiertas planas. En los dos tipos de cubiertas debe dejarse un espacio de al menos 1 m de ancho alrededor de chimeneas, etc.”* (Amador, J.).

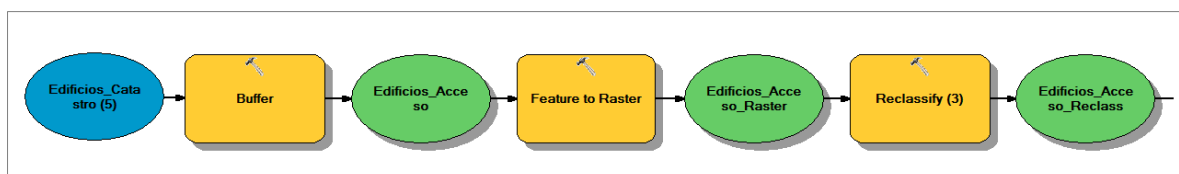
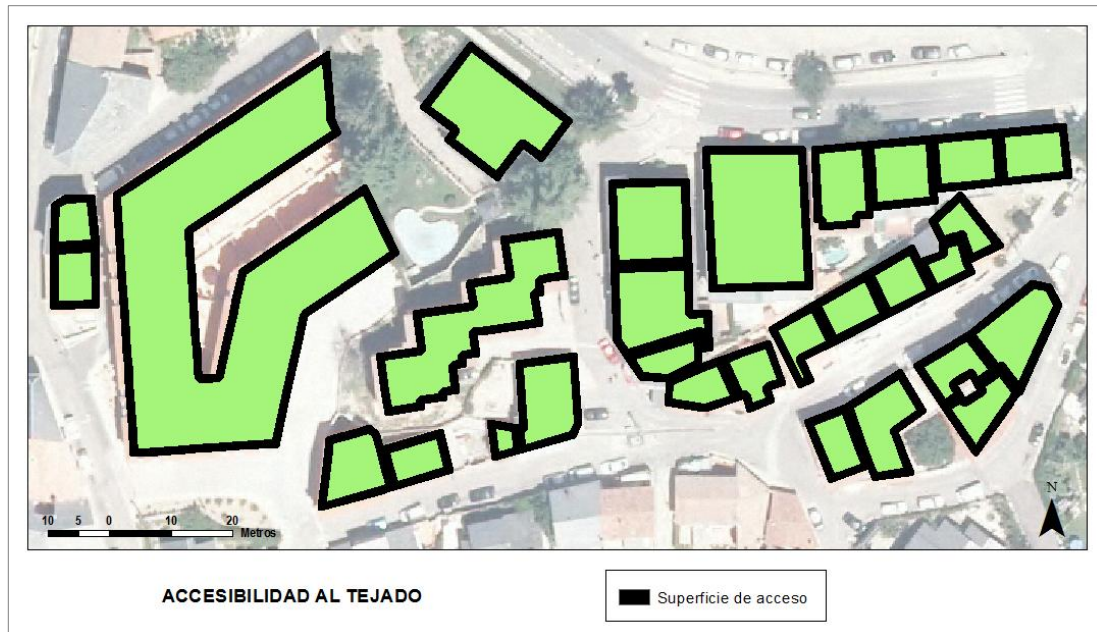


Figura 42. Modelo para delimitar accesibilidad a los tejados.

En este caso con la herramienta que genera zonas de influencia, sobre la capa de los edificios de Catastro se delimitará únicamente una zona de 1 m de ancho alrededor de los tejados. Como los accesos son zonas que se han de eliminar de la superficie total de los

tejados, se reclasifica la capa ráster creada y se asigna valor 1 a las celdas que se sitúan fuera de estas zonas.



Mapa 10. Delimitación de la accesibilidad a los tejados.

8.5.1.4. Monumentos y edificios singulares

En todas las áreas urbanas se localizan monumentos y edificios que por sus características o importancia histórica no son adecuados para la instalación de sistemas fotovoltaicos.

Para identificar los edificios singulares se determina la intersección entre la capa de los edificios de Catastro y la capa de puntuales que contiene la distribución de aquellos que se consideran como tales. De esta forma, una vez identificados los edificios de interés, se genera un ráster que refleja la situación de los mismos.

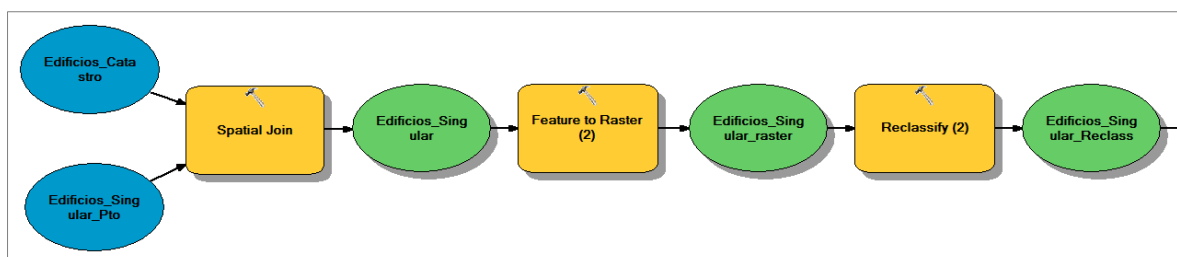


Figura 43. Modelo para identificar edificios singulares.

Los monumentos y edificios singulares son zonas que se excluyen de la instalación de sistemas fotovoltaicos. En este caso se les asignará valor 0 a éstos edificios y valor 1 a los edificios que son aptos para este tipo de instalaciones.

Aunque Miraflores de la Sierra es un municipio donde la presencia de estos edificios no es muy numerosa, sin embargo hay que tener en consideración a algunos de ellos. Con respecto a la zona de estudio seleccionada no existe ningún monumento o edificio singular que haya que tener en cuenta en el análisis, sin embargo este criterio también está incluido en el modelo.

8.5.2. Superficie de tejados

En la caracterización de la superficie de tejados se analiza tanto la superficie útil total como la correspondiente a cada edificio apropiada para sistemas fotovoltaicos.

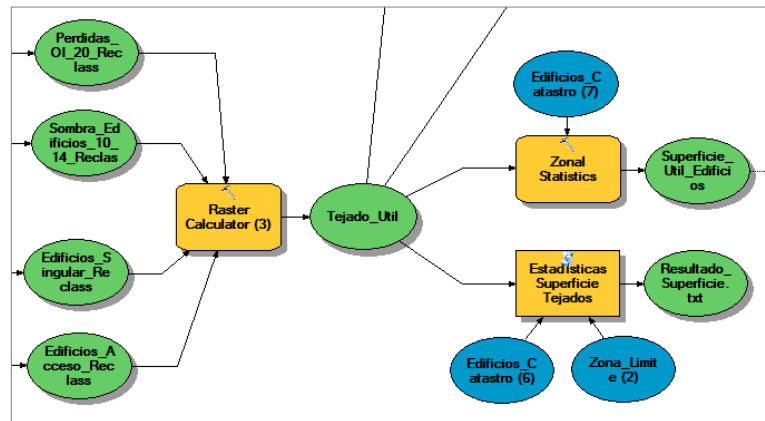


Figura 44. Modelo para calcular la superficie de tejados.

8.5.2.1. Superficie total de tejados útil

Una vez que las capas binarias con las restricciones han sido generadas, la superficie de tejados disponible y efectiva se determina superponiéndolas con una operación de multiplicación según la siguiente expresión:

$$\text{Superficie} = PIO * So * ES * Ac$$

PIO = Pérdidas por inclinación y orientación.

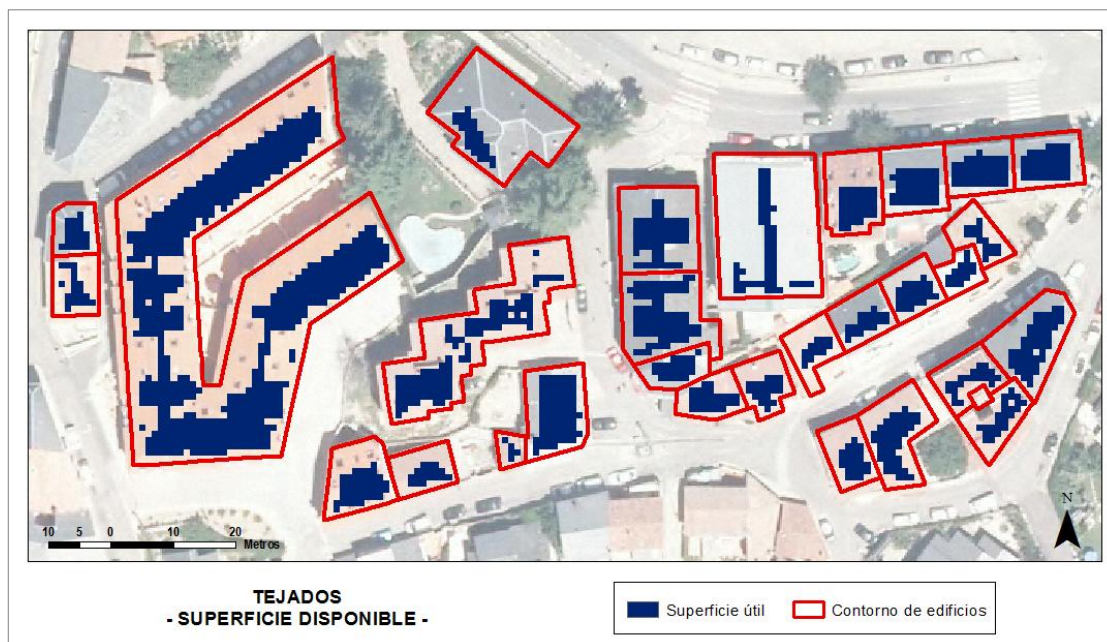
So = Sombras.

ES = Edificios singulares.

Ac = Acceso a módulos fotovoltaicos.

La operación con las capas ráster se realizan con la herramienta 'Calculadora Ráster' obteniéndose como resultado un mapa con aquellas localizaciones de tejados que cumplen todas las condiciones:

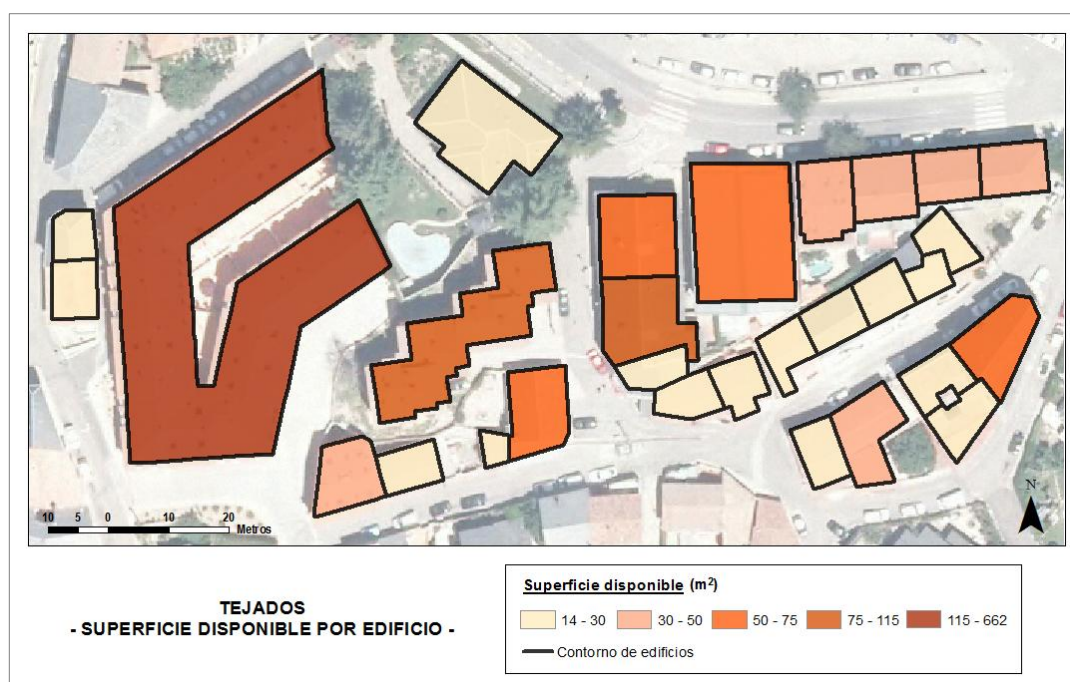
- Pérdidas por la inclinación y orientación no superiores al 20%.
- Superficie sin sombras en las cuatro horas centrales del día a lo largo del año.
- Zonas del tejado no destinadas al acceso a los módulos fotovoltaicos.
- Los edificios no están clasificados como monumentos o edificios singulares.



Mapa 11. Tejados disponibles para instalaciones fotovoltaicas.

8.5.2.2. Estadísticas de superficie de tejados

Al disponer de una capa de polígonos con la planta de los edificios, se puede definir la superficie de tejados útil para instalar módulos en cada uno de ellos. Utilizando la herramienta de 'Estadísticas de zonas' se calculan estadísticas sobre los valores de un ráster (tejados disponible) dentro de las zonas de otro capa (edificios de Catastro).



Mapa 12. Superficie de tejados disponibles por edificio.

Para la obtención de los resultados finales de la superficie total de tejados se ha creado la herramienta 'Estadística superficie de tejados' (Anexo II). La herramienta establece la superficie de las capas ráster de valores enteros determinando el tamaño de cada celda y multiplicándolo por el número de celdas que la constituyen. Se calculan los valores correspondientes a:

- Superficie total de tejados disponible para instalaciones fotovoltaicas.
- Porcentaje de superficie de tejados disponible respecto a la superficie construida.
- Porcentaje de superficie de tejados disponible respecto la superficie total de la zona.

Esta herramienta crea como resultado un archivo de texto (.txt) que muestra los diferentes valores obtenidos de superficie:

SUPERFICIE		
Tejados disponibles	1691.00 m2	
Construida	4673.08 m2	
Total de la zona	13329.96 m2	
RELACION		
superficie de tejados disponible / superficie construida		36.19 %
superficie de tejados disponible / superficie total de la zona		12.69 %

Figura 45. Archivo con los resultados de los cálculos de superficie de tejados.

8.6. Determinación de la irradiación solar

En la generación del mapa de radiación solar se utilizará la herramienta 'Área de radiación solar'⁽¹⁷⁾ que determina la radiación solar que llega a una superficie en un periodo específico de tiempo. La radiación calculada para un área determinada se da como irradiación global (directa + difusa) en unidades de Wh/m² y se determina según el MDS. En el análisis solar se tienen en cuenta los cambios en la posición del Sol y el efecto de los edificios o cualquier otro elemento topográfico. Se definen los siguientes parámetros:

- La latitud (en grados y positiva para el hemisferio norte) se utiliza en el cálculo de la declinación y posición solar. Por defecto, su valor es de 45 grados pero como la capa de entrada ráster dispone de una referencia espacial, la latitud se calcula forma automática (40,81°).
- El periodo de tiempo en el que se determina la radiación solar puede cambiar desde uno a varios días o un año completo. Se ha seleccionado el año 2013.

⁽¹⁷⁾ Las herramientas de análisis de radiación solar realizan los cálculos basándose en los algoritmos desarrollados por Rich et al. (Rich 1990, Rich et al. 1994) y ampliados por Fu y Rich (2000, 2002). <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/009z000000tm000000>.

- Parámetros topográficos como la pendiente y orientación que dependen del modelo de elevación de la zona.
- La proporción difusa de la radiación depende de las condiciones atmosféricas. Su valor varía de 0 a 1, pero en general para cielos despejados un valor adecuado suele ser 0,3.
- La transmitividad se refiere a la relación entre la cantidad de energía recibida en la atmósfera y la que llega finalmente a la superficie del terreno. Por defecto para cielos despejados su valor es de 0,5 aunque los valores oscilan de 0 a 1 (sin transmisión y transmisión completa respectivamente).

Aunque en este caso no influye, una característica a considerar de esta herramienta es la asignación de una latitud a toda el área de estudio, resultando adecuada para áreas reducidas o como máximo de escala local. Sin embargo, cuando se analicen regiones geográficas mayores, será necesario dividir la zona para disponer de diferentes latitudes que permita obtener resultados más precisos.

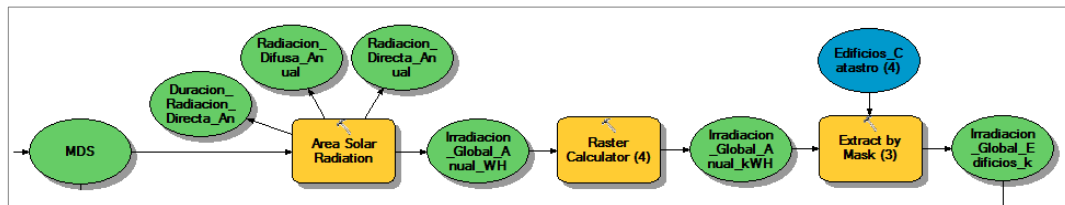
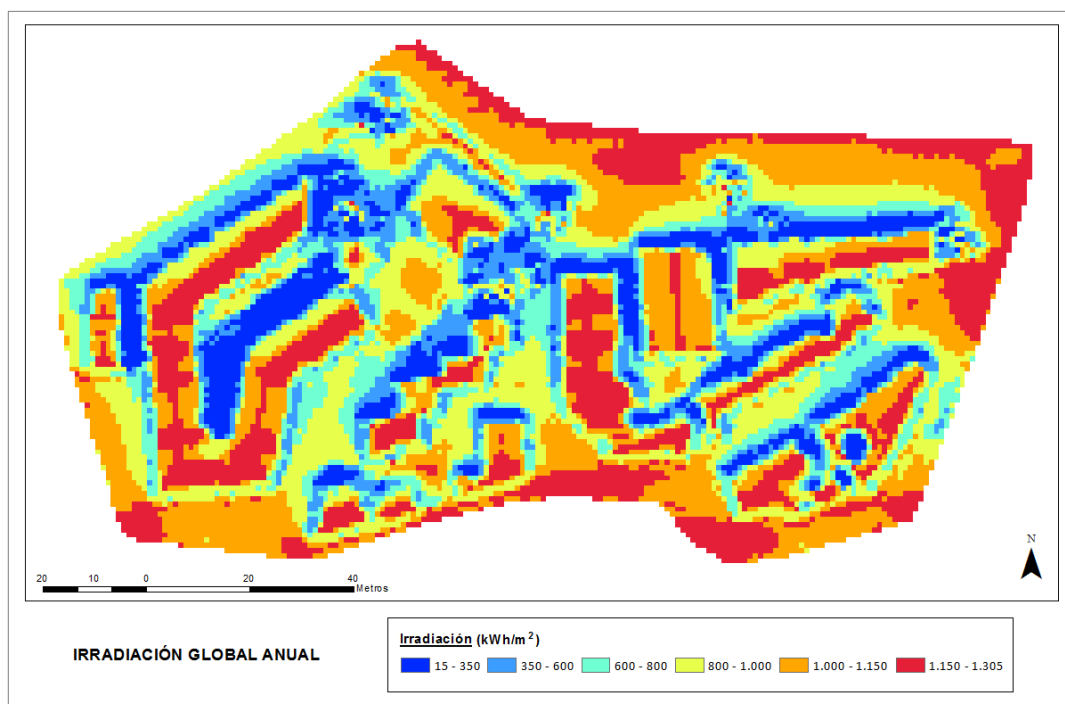
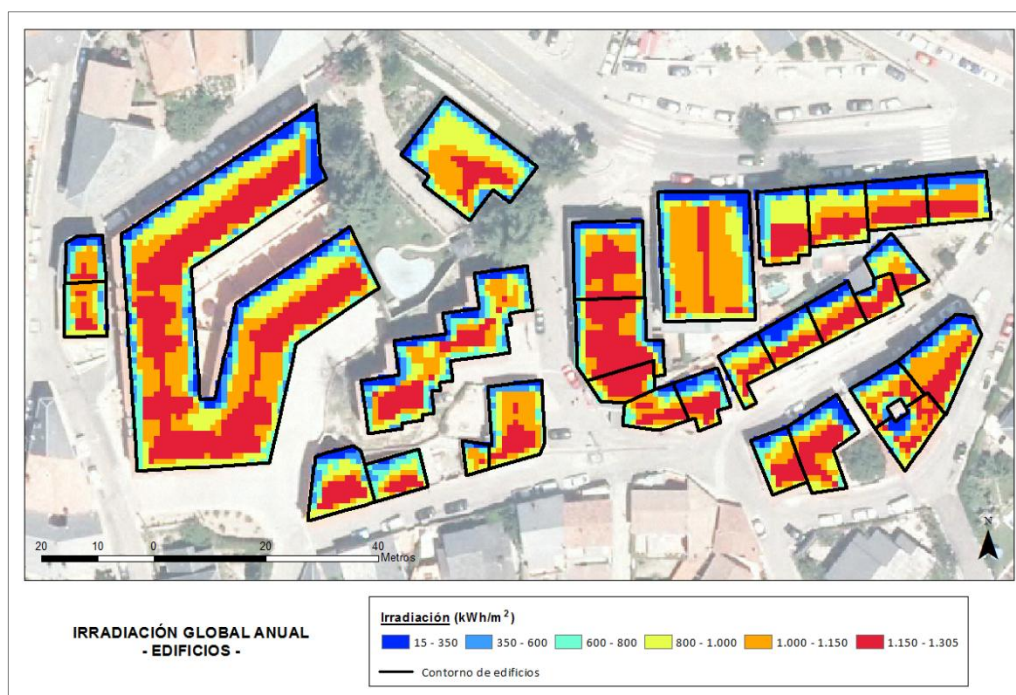


Figura 46. Modelo para la generación de la irradiación solar.

La irradiación global anual resultante en el área de estudio es la siguiente:



Mapa 13. Irradiación global anual.



Mapa 14. Irradiación global anual en los edificios.

8.7. Potencia instalada

En la estimación de la potencia instalada se aplica la fórmula de potencia mostrada anteriormente para lo que se ha creado la herramienta 'Potencia Instalada' que permite escoger el tipo de módulo fotovoltaico para el que se quiere realizar el cálculo. Dependiendo del tipo de módulo, el programa determinará la potencia con la fórmula aplicando el valor de eficiencia correspondiente en cada caso (Anexo III).

Cada modelo presenta valores de eficiencia⁽¹⁸⁾ propios:

TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS		EFICIENCIA
Cristal de silicio	Si-monocristalino	16%
	Si-multicristalino	15%
Lámina delgada	CIS (Cobre/Indio/Seleniuro)	11 %
	Te Cd (Teluro/Cadmio)	10,5 %
	Silicio amorfo	6%

Fuente: Amador, J.

Tabla 8. Eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

Al ejecutar esta herramienta se solicita la capa ráster de la superficie de tejados disponible. Como resultado crea un ráster para cada uno de los tipos de módulos fotovoltaicos seleccionados con los valores de potencia por celda y una tabla con la potencia instalada total en la zona.

⁽¹⁸⁾ La eficiencia es el porcentaje de energía solar que es transformada en energía eléctrica por las células fotovoltaicas.

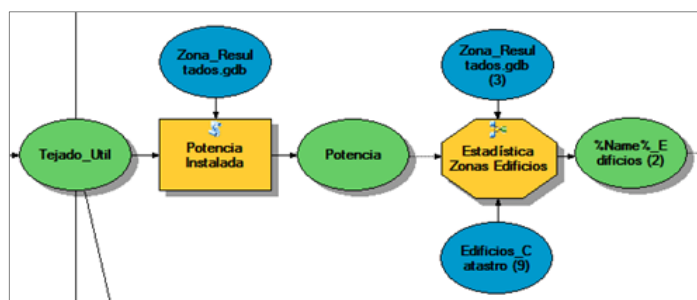


Figura 47. Modelo para el cálculo de la potencia instalada.

A continuación se establece el valor de potencia instalada en cada edificio. Para ello se utiliza la herramienta de ‘Estadísticas zonales’ en un submodelo con un iterador ráster que permite repetir el proceso para cada uno de los ráster de potencia de cada módulos (Anexo VII). Los resultados obtenidos de la potencia instalada por edificios para cada tipo de módulo fotovoltaico son los siguientes:



Mapa 15. Potencia instalada para módulos del tipo Si-monocristalino.



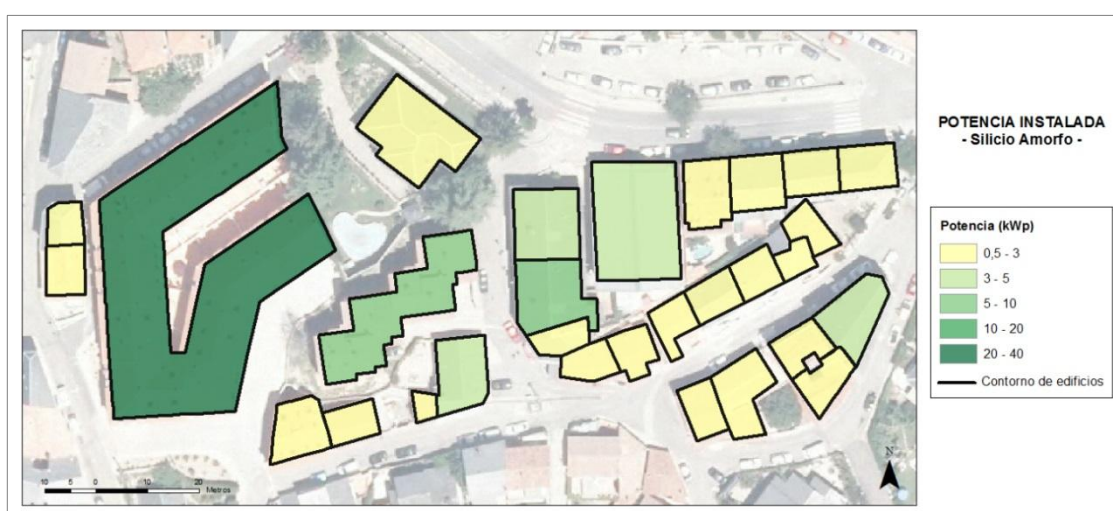
Mapa 16. Potencia instalada para módulos del tipo Si-multicristalino.



Mapa 17. Potencia instalada para módulos del tipo CIS.



Mapa 18. Potencia instalada para módulos del tipo TeCd.



Mapa 19. Potencia instalada para módulos del tipo Silicio amorfo.

8.8. Energía producida

El último cálculo consiste en la estimación de la energía que producirán los módulos instalados. Como con el módulo solar de ArcGis se calcula la irradiación global anual, la fórmula utilizada será:

$$E = I_A * e * A_{PV} * PR$$

E = Energía anual (kWh).

I_A = Irradiación solar global (kWh/m²).

e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

A_{PV} = Superficie de tejado disponible.

PR = Performance Ratio = 0,8.

La estimación de la energía producida se lleva a cabo con una nueva herramienta ‘Energía’ que, al igual que la creada en el cálculo de la potencia instalada, permite escoger el tipo de módulo fotovoltaico para el que se realiza el cálculo. Aplicando la fórmula anterior, el programa determinará la energía de cada tipo de módulo según su valor de eficiencia (Anexo IV).

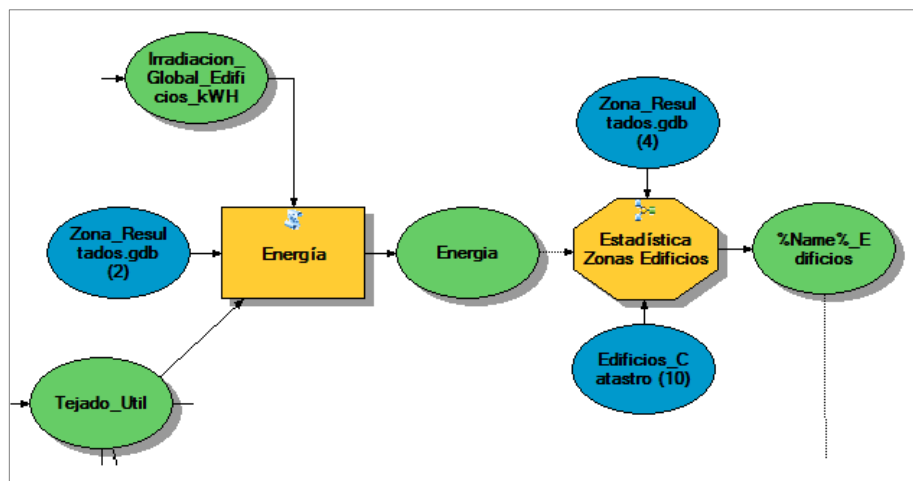
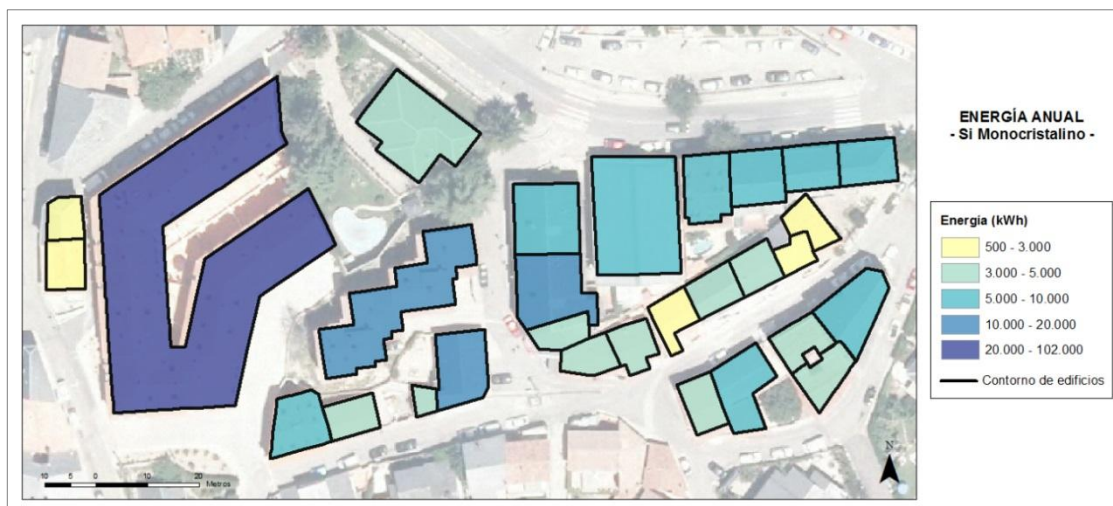


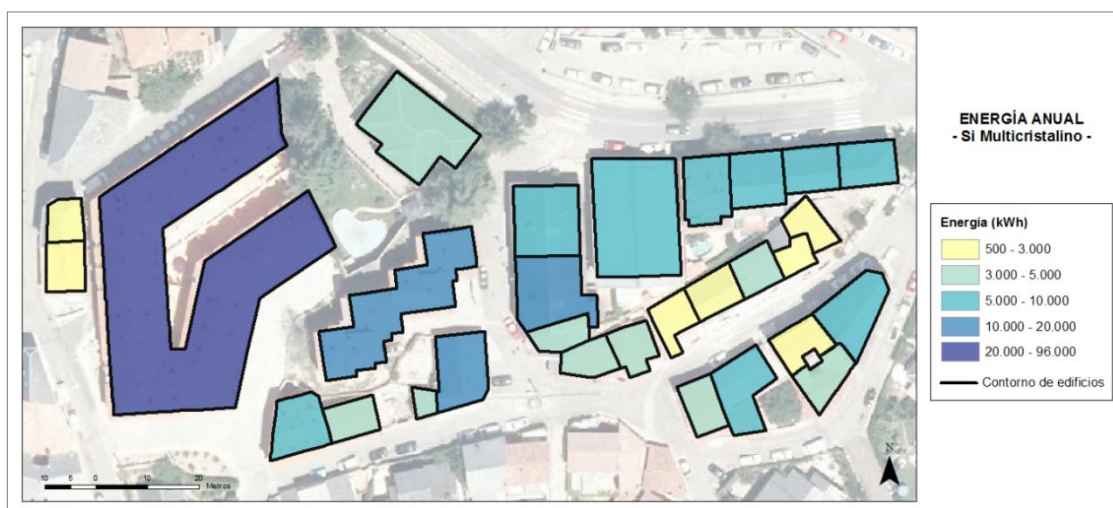
Figura 48. Modelo para el cálculo de la energía anual generada.

Los datos de entrada solicitados por esta herramienta son las capas ráster de irradiación global y de la superficie de tejados disponible. Al ejecutarla se obtiene como resultado un ráster de la energía producida por celda para cada tipo de módulo fotovoltaico seleccionado y una tabla con la energía total generada en la zona.

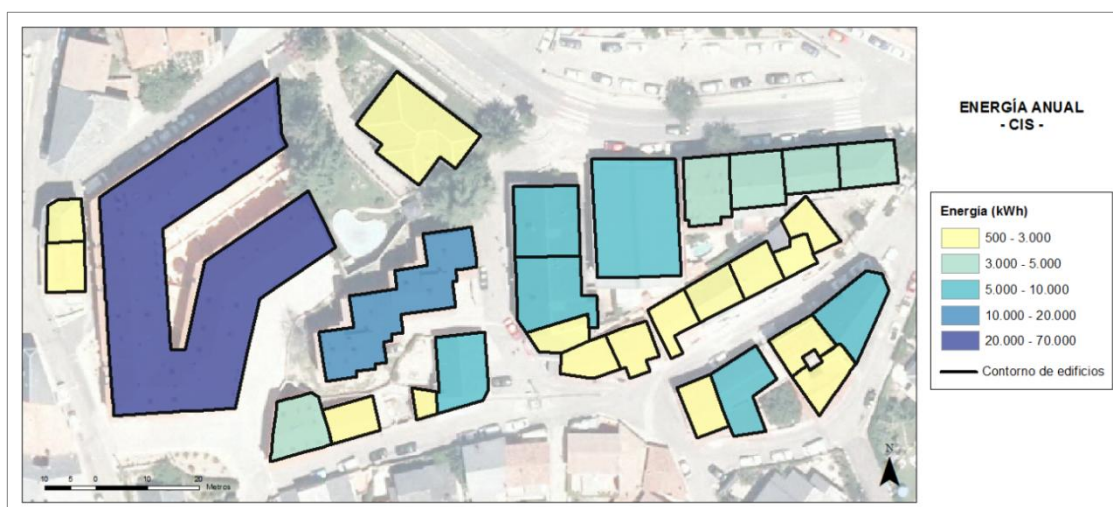
También se determina el valor de la energía por cada edificio utilizando el mismo submodelo del apartado anterior que itera la herramienta de ‘Estadísticas Zonales’ (Anexo VII). Los resultados obtenidos de producción de energía por edificios para cada tipo de módulo fotovoltaico son los siguientes:



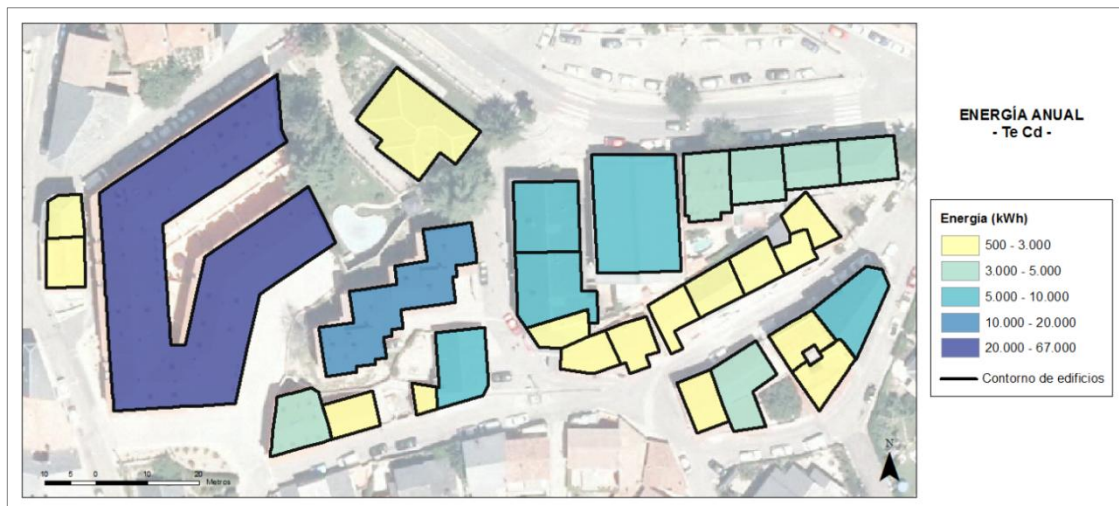
Mapa 20. Energía anual producida por módulos del tipo Si-monocristalino.



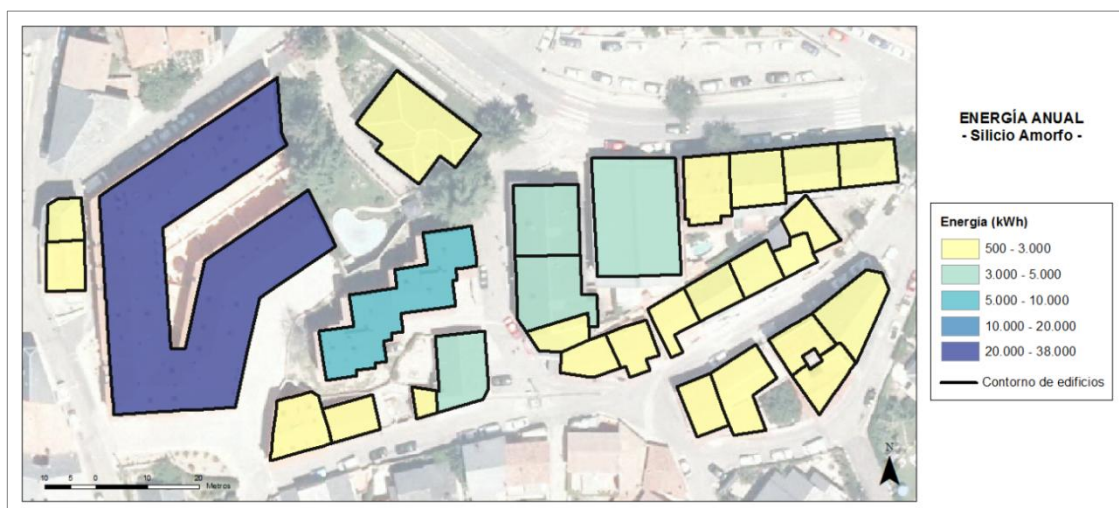
Mapa 21. Energía anual producida por módulos del tipo Si-multicristalino.



Mapa 22. Energía anual producida por módulos del tipo CIS.



Mapa 23. Energía anual producida por módulos del tipo TeCd.



Mapa 24. Energía anual producida por módulos del tipo Silicio amorfo.

8.9. Asignación de resultados a los edificios

La última fase del modelo consiste en asignar a los polígonos con la planta de los edificios de Catastro la recopilación de los resultados obtenidos correspondientes a cada uno de ellos:

- Superficie útil de tejados disponible para la instalación de módulos fotovoltaicos.
- Potencia instalada.
- Energía producida.

Para asociar los valores a los edificios se extraen los resultados de cada ráster resultante con una nueva herramienta 'Extraer valores a puntos (Iterado)' (Anexo V) que consiste en iterar la herramienta existente de 'Extraer valores múltiples a puntos' para que recorra los rástres asignados. Con ella se obtienen los valores de las celdas de las capas ráster

cuya ubicación coincide con los centroides de los edificios y se registran los datos en la tabla de atributos de los centroides.

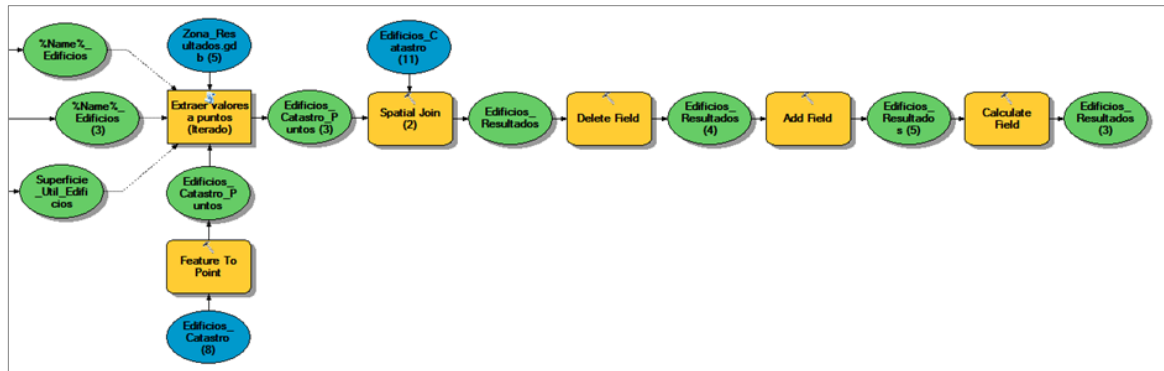


Figura 49. Modelo para asignar los resultados a la distribución de edificios de Catastro.

Finalmente con una unión espacial de los centroides con sus correspondientes edificios se asocian a los mismos los datos obtenidos.

Edificios_Resultados														
REFCAT	Potencia	SI	M	Potencia	SI	Mu	Potencia	Ci	Potencia	Te	Util	Superficie	Edi	
5382505VL315	3,2		3	2,2		2,1	1,2	3008,905	2820,848	2068,622	1974,594	1128,339	20	72,18445
5382506VL315	3,2		3	2,2		2,1	1,2	2971,116	2785,421	2042,642	1949,795	1114,168	20	55,6852
5382508VL315	4,48		4,2	3,08		2,94	1,68	4300,794	4031,995	2956,796	2822,396	1612,798	28	269,8777
5382509VL315	17,76		16,65	12,21		11,655	6,66	16768,25	15720,23	11528,17	11004,16	6288,093	111	340,5227
5382510VL315	11,84		11,1	8,14		7,77	4,44	11022,27	10333,38	7577,812	7233,366	4133,352	74	133,3223
5382512VL315	6,56		6,15	4,51		4,305	2,46	6547,345	6138,137	4501,3	4296,695	2455,254	41	110,1803
5482401VL315	9,12		8,55	6,27		5,985	3,42	8457,38	7928,794	5814,449	5550,156	3171,518	57	372,3225
5482402VL315	5,76		5,4	3,96		3,78	2,16	5849,785	5484,174	4021,727	3838,921	2193,669	36	116,1954
5482403VL315	7,2		6,75	4,95		4,725	2,7	6752,558	6330,523	4642,384	4431,366	2532,209	45	111,7809
5482404VL315	7,04		6,6	4,84		4,62	2,64	6612,046	6198,793	4545,782	4339,155	2479,517	44	93,9626
5482405VL315	6,88		6,45	4,73		4,515	2,58	6387,319	5988,112	4391,282	4191,678	2395,245	43	94,93995
5482406VL315	2,56		2,4	1,76		1,68	0,96	2271,173	2129,225	1561,432	1490,458	851,69	16	60,6527
5482407VL315	2,56		2,4	1,76		1,68	0,96	2462,055	2308,177	1692,663	1615,724	923,2707	16	42,9955
5482408VL315	4,32		4,05	2,97		2,835	1,62	4061,077	3807,26	2791,99	2665,082	1522,904	27	69,2203
5482409VL315	3,2		3	2,2		2,1	1,2	3093,725	2900,368	2126,936	2030,257	1160,147	20	73,83772
5482410VL315	2,24		2,1	1,54		1,47	0,84	2126,153	1993,268	1461,73	1395,288	797,3073	14	66,4998
5482411VL315	3,52		3,3	2,42		2,31	1,32	3496,017	3277,516	2403,512	2294,261	1311,006	22	68,4719
5482412VL315	4,48		4,2	3,08		2,94	1,68	4215,077	3951,635	2897,885	2766,144	1580,654	28	65,92465
5482413VL315	3,84		3,6	2,64		2,52	1,44	3785,557	3548,959	2602,57	2484,271	1419,584	24	58,06519
5482414VL315	13,6		12,75	9,35		8,925	5,1	13070,27	12253,38	8985,813	8577,366	4901,352	85	181,6026
5482415VL315	9,599999		9	6,6		6,3	3,6	9278,098	8698,217	6378,692	6088,751	3479,287	60	172,1673
5482601VL315	3,84		3,6	2,64		2,52	1,44	3667,975	3438,727	2521,733	2407,109	1375,491	24	71,601
5482604VL315	8,639999		8,1	5,94		5,67	3,24	7871,593	7379,619	5411,72	5165,732	2951,847	54	135,832
5482602VL315	8		7,5	5,5		5,25	3	7539,339	7068,131	5183,296	4947,691	2827,252	50	127,0336
5382511VL315	3,68		3,45	2,53		2,415	1,38	3404,566	3191,781	2340,639	2234,247	1276,712	23	68,12697
5382511VL315	3,68		3,45	2,53		2,415	1,38	3404,566	3191,781	2340,639	2234,247	1276,712	23	23,01907
5482603VL315	3,52		3,3	2,42		2,31	1,32	3244,483	3041,703	2230,583	2129,192	1216,681	22	76,5489
5482605VL315	4		3,75	2,75		2,625	1,5	3690,638	3459,973	2537,313	2421,981	1383,989	25	79,42044
5382516VL315	105,92		99,3	72,82		69,50999	39,72	102504,6	96098,05	70471,9	67268,63	38439,21	662	1461,083

Tabla 9. Tabla de atributo de los edificios.

9. RESULTADOS

En este procedimiento se ha desarrollado un modelo con ArcGis (Anexo VIII) con el que se pretende, además de establecer cuáles son las zonas de mayor aptitud para la situación de instalaciones fotovoltaicas, realizar una aproximación sobre la energía producida comparando los resultados que se obtendrían con diferentes tecnologías.

Para realizar este análisis se ha incluido en el modelo una serie de herramientas desarrolladas en Python y algunos submodelos. Estos elementos han sido creados para resolver las necesidades que han aparecido a lo largo del procedimiento y en ocasiones adaptar las herramientas existentes en ArcGis a la ejecución del modelo.

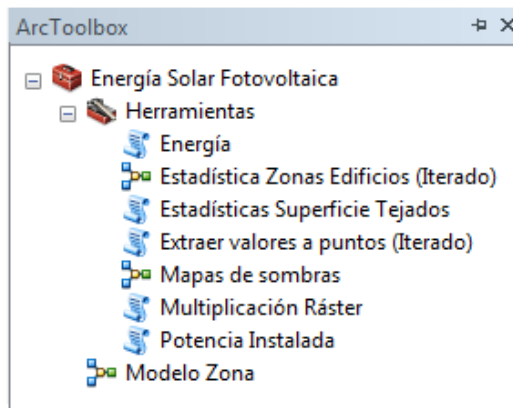


Figura 50. Nuevas herramientas y submodelos.

Una característica importante de este modelo es la utilización de una nube de puntos de datos LIDAR, que una vez depurada y clasificada en los elementos que la definen, se constituye como la fuente principal de información.

El objetivo final ha sido estudiar una pequeña área del núcleo urbano de Miraflores de la Sierra. Se trata de incorporar en un proyecto todos los datos de esa zona necesarios para facilitar su análisis y delimitar aquellos tejados de los edificios que reúnen las mejores condiciones para aplicaciones solares, siendo en ésta zona la situación óptima la orientación sur con una inclinación de aproximadamente 32°.

Como ya se ha descrito anteriormente, en este municipio se localizan numerosas viviendas unifamiliares que conforman un tejido urbano discontinuo con una densidad construida media y baja. Dependiendo de la concentración de edificios en una zona la disponibilidad de tejados adecuada donde poder instalar sistemas solares variará considerablemente. Los resultados obtenidos sólo representan una muestra de una zona de alta concentración, pudiendo obtenerse resultados bastante diferentes en otros casos.

Según la distribución de 'Usos y cobertura del suelo' mostrada en el apartado de descripción del área de estudio, la zona seleccionada del municipio corresponde a un tejido urbano denso con una ocupación del suelo del 50 - 80 % e incluso superior en alguna de las manzanas. Al realizarse el análisis se obtiene como resultados que la superficie de tejados para instalar módulos fotovoltaicos es de 1691 m², representando esta superficie disponible un 36,19 % con respecto a la superficie en planta construida y un 12,69 % de la superficie total de la zona.

La radiación solar que llega a una superficie varía dependiendo de la posición de los edificios, la orientación de los tejados y la presencia de elementos que generen sombras. El algoritmo que calcula la irradiación en ArcGis tiene en cuenta estos elementos y determina un máximo de 1305,28 kWh/m² en los tejados de la zona analizada considerando unas condiciones atmosféricas de cielo despejado.

Sólo un pequeño porcentaje de la cantidad de energía que llega del Sol en un día promedio se puede convertir en energía eléctrica mediante paneles solares fotovoltaicos.

La eficiencia de los paneles solares depende de diferentes factores como su temperatura, exposición al Sol directo, inclinación, orientación, etc. Existen una gran variedad de módulos fotovoltaicos en el mercado que se diferencian principalmente en el material del que están constituidos y en su forma de fabricación.

MÓDULO FOTOVOLTAICO	EFICIENCIA (%)	POTENCIA INSTALADA (kWp)	ENERGÍA PRODUCIDA (kWh)
Si-Monocristalino	16	270,56	255.624,40
Si-Multicristalino	15	253,65	239.647,90
CIS	11	186,01	175.741,80
Te Cd	10,5	177,55	167.753,50
Silicio amorfo	6	101,46	95.859,14

Tabla 10. Resultados de potencia y energía.

Las características propias de cada uno de los módulos hacen que los valores de eficiencia oscilen entre el 16 % del tipo Si-monocristalino al 6 % del tipo Silicio amorfo. Estas diferencias en la eficiencia de los módulos originan unos resultados bastante dispares según los tipos. Por ejemplo, los módulos de Silicio amorfo producirían un 37 - 39 % de la energía generada por los tipos de cristal de silicio para una misma superficie de tejado, aunque con los otros modelos de lámina delgada (CIS y Te Cd) superaría incluso el 60 %.

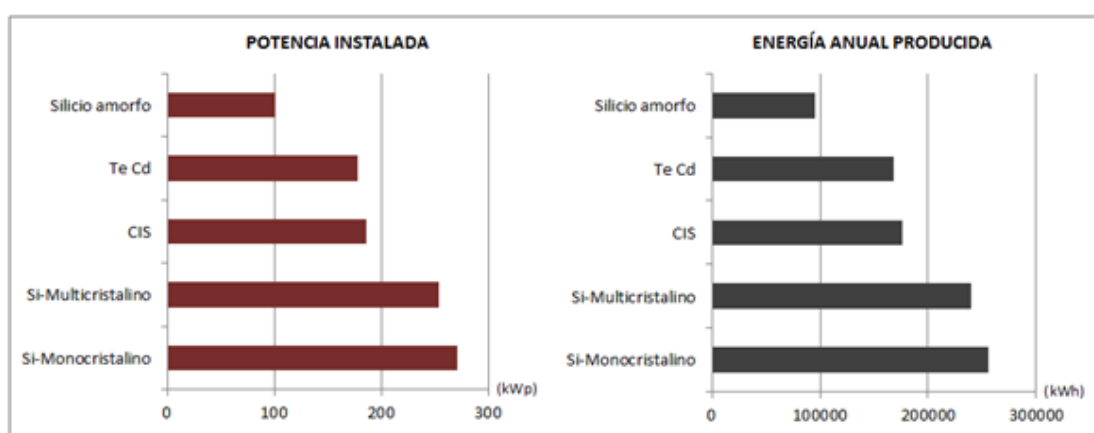


Figura 51. Potencia instalada y energía anual producida.

Como se describió en la sección de fuentes de información, existen bases de datos climáticas como PVGIS y Adrase que disponen de datos de irradiación solar. En ambas la irradiación global en la zona de estudio presenta valores muy cercanos, según PVGIS la irradiación es de 1.653,45 kWh/m² y para Adrase tiene un valor de 1.715,50 kWh/m².

Si se comparan los resultados de energía calculados con la herramienta de irradiación de ArcGis con los datos de PVGIS y Adrase se observa una diferencia de aproximadamente el 30 %. Este margen puede ser debido a que la irradiación solar determinada en el modelo considera la forma de la envolvente de los edificios con el MDS, mientras que PVGIS y Adrase utilizan datos de irradiación sobre el plano horizontal.

MÓDULO FOTOVOLTAICO	EFICIENCIA (%)	ENERGÍA PRODUCIDA (kWh)		
		MODELO	ADRASE	PVGIS
Si-Monocristalino	16	255.624,40	371.316,54	357.885,95
Si-Multicristalino	15	239.647,90	348.109,26	335.518,07
CIS	11	175.741,80	255.280,12	246.046,59
Te Cd	10,5	167.753,50	243.676,48	234.862,65
Silicio amorfo	6	95.859,14	139.243,70	134.207,23

Tabla 11. Energía producida dependiendo de la fuente de datos de irradiación.

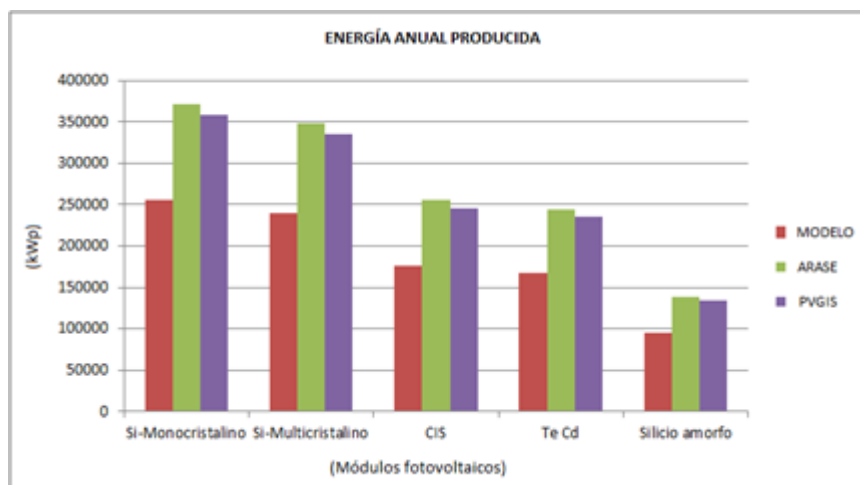


Figura 52. Resultados de energía anual producida.

El modelo no sólo permite realizar cálculos globales para una zona determinada sino que también proporciona como resultado final los datos individuales de todos los edificios. Seleccionando cada uno de ellos se obtiene una relación de sus valores asociados de superficie, potencial instalada y energía que se han calculado a lo largo del modelo.



Figura 53. Datos asociados a cada edificio.

10. CONCLUSIÓN

La implantación de energía fotovoltaica en áreas urbanas requiere un pormenorizado análisis multicriterio de una gran cantidad de variables asociadas a entidades espaciales y no cabe duda que los Sistemas de Información Geográfica responden adecuadamente a las necesidades de este tipo de estudios. En este caso se ha realizado un estudio piloto sobre un área pequeña del municipio de Miraflores de la Sierra que, basándose en datos LIDAR nos ha permitido desarrollar un modelo y conocer las posibilidades de esta técnica en las aplicaciones fotovoltaicas en edificios.

La metodología propuesta plantea clasificar previamente una nube de puntos LIDAR y a continuación establece una serie de criterios con los que evaluar las zonas adecuadas para instalar módulos solares, siendo necesario utilizar para cada una de las fases del procedimiento un programa diferente, VRMesh y ArcGis.

Una de las funciones que presenta este modelo es la opción de escoger entre varios tipos de módulos fotovoltaicos y calcular la energía generada por cada uno. No todos los módulos presentan la misma eficiencia y por lo tanto con algunos se necesitará una mayor superficie para obtener una misma producción de electricidad. Al poder comparar los resultados de las diferentes tecnologías, se podrá decidir cuál es la opción que más compensa teniendo en cuenta el coste de los módulos y la superficie disponible.

El modelo inicialmente es común para cualquier nube de puntos LIDAR y la aplicación puede aprovecharse para otro tipo de nube de puntos con las que, una vez clasificadas y modificado el tamaño de celda del MDS se podrá trabajar.

En el desarrollo del procedimiento se ha observado que a consecuencia de la precisión de la nube puntos, en la caracterización de los tejados de los edificios hay que considerar algunos factores como la complejidad de los mismos que afectarán a la definición de los tejados. Cuando no son homogéneos, es decir, en un edificio aparecen diferentes alturas o son tejados que disponen de más de dos aguas, el número de puntos disponibles para delimitar una superficie es mucho menor y no se definen correctamente. No siempre se disponen de suficientes puntos para establecer un plano por lo que la precisión de los tejados dependerá de su tipología, cuanto mayor es la complejidad de los mismos su caracterización resulta menos detallada.

Disponiendo de una nube de puntos de mayor densidad, el margen de error generado sería mucho menor y se identificarían otros elementos como chimeneas, antenas, sistemas de climatización o cualquier otro objeto presente en los tejados que no están representados por los datos LIDAR actuales.

Una particularidad de este procedimiento es la estimación de las sombras ocasionadas no sólo por los edificios sino también por los árboles presentes en la zona. Con respecto a las masas arboladas sólo se ha establecido la presencia de los árboles, aunque sería

interesante incluir en el análisis las diferentes especies (caducifolias y perennifolias) y sus patrones de crecimiento para estimar cuál sería el tamaño de copa que llegaría a ocupar.

Además de la delimitación de otros elementos en los tejados y los árboles, en el futuro se podrían trabajar con nuevos criterios que permitan mejorar la precisión de los resultados obtenidos al considerar un mayor número de variables. Una posibilidad consistiría en utilizar datos relacionados con la población en las edificaciones para calcular la producción de energía per cápita. Se podría trabajar con factores climáticos como las variaciones de temperatura o incluso la influencia del viento sobre la disposición de los módulos fotovoltaicos. Del mismo modo, junto con estas mejoras futuras queda abierta la alternativa de crear herramientas específicas que posibiliten la aplicación de los nuevos criterios establecidos en el modelo.

En definitiva, los análisis geográficos pueden ayudar a fomentar el mercado de las energías renovables además de impulsar las políticas que faciliten el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas. En este sentido la evolución en la tecnología LIDAR puede ser utilizada para mejorar la exactitud y la eficiencia en el análisis del potencial solar en zonas urbanas a través de la utilización de un Sistema de Información Geográfica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arboit, M., Diblasi, A., Fernández Llano, J.C. y de Rosa, C., 2008. Assessing the solar potential of low-density urban environments in Andean cities with desert climates: The case of the city of Mendoza, in Argentina. *Renewable Energy*, 33, pp. 1733-1748.
- Bergamasco, L. y Asinari, P., 2011. Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Further improvements by ortho-image analysis an application to Turin (Italy). *Solar Energy*, 85, pp. 2741-2756.
- Blanc, Ph. Y Wald, L., 2012. The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the sun for multidecadal time period. *Solar Energy*, 88, pp. 3072-3083.
- Brito, M.C., Gomes, N., Santos, T. y Tenedório, J.A., 2012. *Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LIDAR data*. *Solar Energy*, 86, pp. 283-288.
- Chaves, A. y Bahill A.T., 2010. Locating sites for photovoltaic solar panels. Pilot study uses DEM derived from LIDAR. ESRI.
- Díaz-Vilariño, L., Lagüela, J., Armesto, J. y Arias, P., 2013. Semantic as-built 3d models including shades for the evaluation of solar influence on buildings. *Solar Energy*, 92, pp. 269-279.
- *Documento Básico HE - Ahorro de Energía, Código Técnico de la Edificación*, 2009. Ministerio de Fomento.
- Downey, A., 2008. Think Python. How to think like a computer scientist. Needham: Green Tea Press.
- Gooding, J. et al., 2013. Solar city indicator: A methodology to predict city level PV installed capacity by combining physical capacity and socio-economic factors. *Solar Energy*, 95, pp. 325-335.
- La Genusa, M. et al. 2011. A model for predicting the potential diffusion of solar energy systems in complex urban environments. *Energy Policy*, 39, pp. 5335-5343.
- Lutz, M., 2011. *Programming Python*. Sebastopol: O'Really Media, Inc.
- Sumerling, G., 2011. Lidar Analysis in ArcGIS 10 for Forestry Applications. ESRI.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2011. Solar Generation 6. Solar photovoltaic electricity empowering the World. EPIA.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2012. *Global market outlook for photovoltaic until 2016*. EPIA.
- Hofierka, J. y Kaňuk, J., 2009. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renewable Energy*, xxx, pp. 1-9.

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2011. *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*. PROGENSA.
- Izquierdo, S., Rodrigues, M. y Fueyo, N., 2008. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, 82, pp. 929-939.
- La Gennusa, M. et al., 2011. A model for predicting the potential diffusion of solar energy systems in complex urban environments. *Energy Policy*, 39, pp. 5335-5343.
- Melo, E.G., Almeida, M.P., Ziller, R. y Grimoni, J.A.B., 2013. Using a shading matrix to estimate the shading factor and the irradiation in a three-dimensional model of a receiving surface in an urban environment. *Solar Energy*, 92, pp. 15-25.
- Nguyen, H.T. y Pearce, J.M., 2012. Incorporating shading losses in solar photovoltaic potential assessment at the municipal scale. *Solar Energy*, 86, pp. 1245-1260.
- Nguyen, H.T. et al., 2012. The application of LIDAR to assessment of rooftop solar photovoltaic deployment potential in municipal district unit. *Sensors*, 12, pp. 4534-4558.
- Schmid, K. et al., 2008. *Lidar 101: An introduction to Lidar technology, data, and applications*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center.
- Wiginton, L.K., Nguyen, H.T. y Pearce, J.M., 2010. *Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, pp. 345-357.

RECURSOS DIGITALES

- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y Unión Española Fotovoltaica (UNEF), 2014. *Acceso a datos de radiación solar de España (ADRASE)*. [En línea] Disponible en: <<http://www.adrase.es>> [Consultado el 4 de febrero de 2014].
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Comunidad de Madrid, 2014. *IDEM - Infraestructura de Datos Espaciales Comunidad de Madrid*. [En línea] Disponible: <<http://www.madrid.org/cartografia/idem/>> [Consultado el 4 de febrero de 2014].
- ESRI, 2014. *Biblioteca de ayuda de ArcGIS 10.1*. [En línea] Disponible: <<http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/>> [Consultado 4 de febrero de 2014].
- Instituto de Estadística, Comunidad de Madrid, 2014. *ALMUDENA, Bando de datos municipal y zonal*. [En línea] Disponible: <<http://www.madrid.org/iestadis/>> [Consultado el 4 de febrero de 2014].

- European Environment Agency, 2006. *Urban Atlas: Madrid*, 1:10.000. [En línea] Disponible:<<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>>[Consultado el 4 de febrero de 2014].
- Join Research Centre, Institute for Energy and Transport (IET), European Comission, 2014. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. [En línea] Disponible: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>> [Consultado el 4 de febrero de 2014].
- Ministerio de Economía y Competitividad, 2014. *Instituto Nacional de Estadística (INE)*. [En línea] Disponible: <<http://www.ine.es>> [Consultado 4 de febrero de 2014].
- Ministerio de Fomento, 2014. *Instituto Geográfico Nacional (IGN)*. [En línea] Disponible: <<http://www.ign.es>> [Consultado el 4 de febrero de 2014].
- Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas, 2014. *Portal de la Dirección General del Catastro*. [En línea] Disponible: <<http://www.catastro.meh.es>> [Consultado el 4 de febrero de 2014].
- SoDa, 2014. *SoDa, solar radiation data. Solar Energy Service for Professionals*. [En línea] Disponible: <<http://www.soda-is.com>> [Consultado el 4 de febrero de 2014].

ANEXO I. HERRAMIENTA DE MULTIPLICACIÓN DE CAPAS RÁSTER

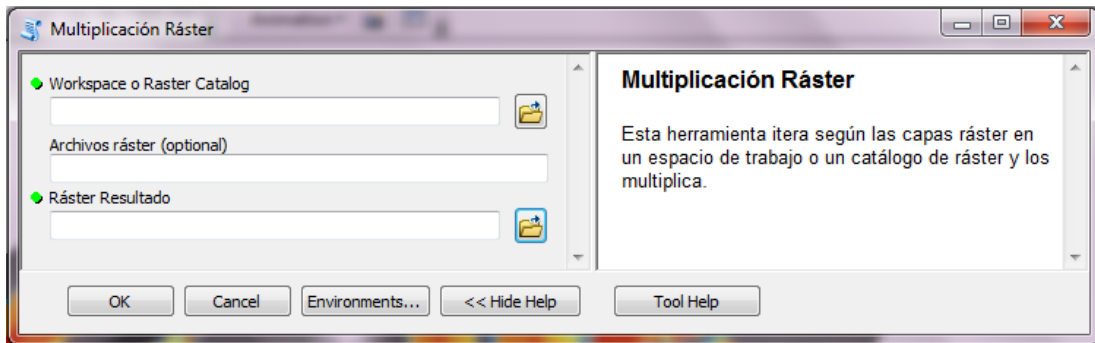


Figura 54. Ventana de la herramienta 'Multiplicación Ráster'.

Herramienta: MULTIPLICACIÓN RÁSTER

Nombre: Multiplica_Raster.py

Versión: ArcGIS 10.1

Fecha: Febrero de 2014

Esta herramienta itera según las capas ráster en un espacio de trabajo o un catálogo de ráster y las multiplica

IMPORTAR MÓDULOS

```
import arcpy
```

```
from arcpy import env
```

```
from arcpy.sa import *
```

COMPROBACIÓN DE LAS LICENCIAS NECESARIAS

```
arcpy.CheckOutExtension ("spatial")
```

SOBREScribir ARCHIVOS PRE-EXISTENTES

```
arcpy.env.overwriteOutput = True
```

WORKSPACE, CAPAS RÁSTER DE DATOS Y RESULTADOS

```
env.workspace = arcpy.GetParameterAsText (0)
```

```
inRaster = arcpy.GetParameterAsText (1)
```

```
outRaster = arcpy.GetParameterAsText (2)
```

ITERACIÓN Y MULTIPLICACIÓN DE LAS CAPAS RÁSTER

Iteración

```
rasterList = arcpy.ListRasters (inRaster, "All")
```

Multiplicación

```
valor = 1
```

```
for i in rasterList:
```

```
arcpy.Times_3d (valor, i, outRaster)
```

```
valor = Raster (i) * valor
```

ANEXO II. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DE TEJADOS

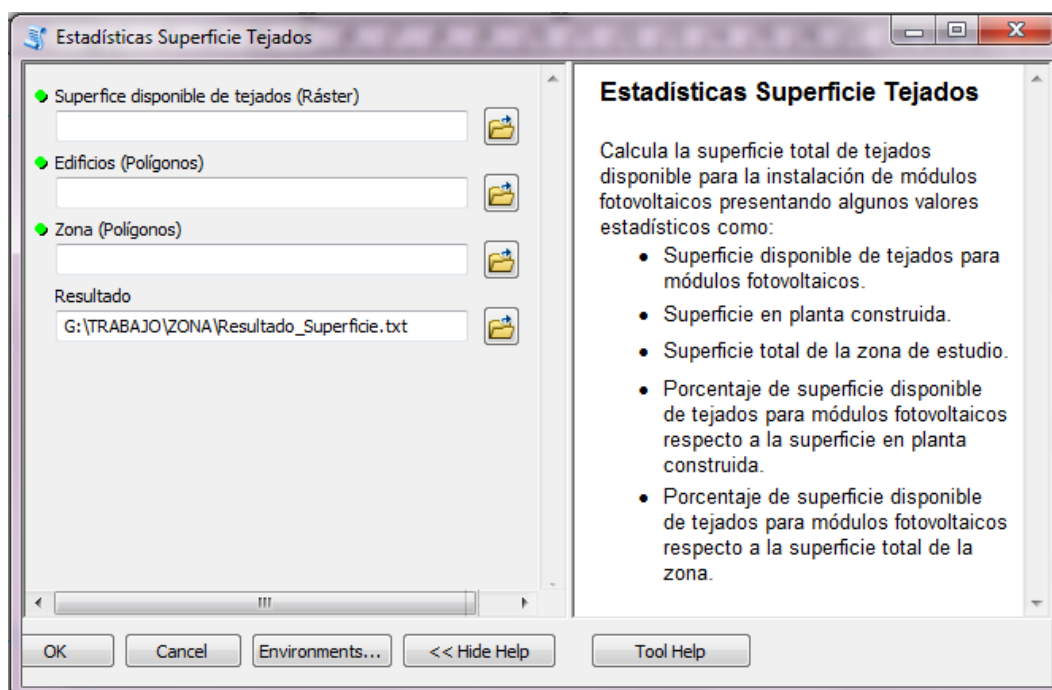


Figura 55. Ventana de la herramienta 'Estadística superficie de tejados'.

Herramienta: ESTADÍSTICA SUPERFICIE TEJADOS

Nombre: Estadística_Superficie_Tejados.py

Versión: ArcGIS 10.1

Fecha: Febrero de 2014

Calcula la superficie total de tejados disponible para la instalación de módulos fotovoltaicos presentando algunos valores estadísticos como:

- Superficie disponible de tejados para módulos fotovoltaicos.

- Superficie en planta construida.

- Superficie total de la zona de estudio.

- Porcentaje de superficie disponible de tejados para módulos fotovoltaicos respecto a la superficie en planta construida.

- Porcentaje de superficie disponible de tejados para módulos fotovoltaicos respecto a la superficie total de la zona.

IMPORTAR MÓDULOS

```
import arcpy
```

```
from arcpy import env
```

```
from arcpy.sa import *
```

COMPROBACIÓN DE LAS LICENCIAS NECESARIAS

```
arcpy.CheckOutExtension ("spatial")
```

```
# SOBRESERIBIR ARCHIVOS PRE-EXISTENTES
```

```
arcpy.env.overwriteOutput = True
```

```
# CAPAS RÁSTER DE DATOS Y RESULTADOS
```

```
inputRaster = arcpy.GetParameterAsText (0)
```

```
inputPol1 = arcpy.GetParameterAsText (1)
```

```
inputPol2 = arcpy.GetParameterAsText (2)
```

```
resultado = arcpy.GetParameterAsText (3)
```

```
# CÁLCULO DEL ÁREA DE UNA CAPA RÁSTER
```

```
# Calcula la superficie de una capa ráster de valores enteros a partir de tamaño de celda y el número de celdas
```

```
# (Si la capa ráster no disponible de tabla de atributos, hay que crearla previamente)
```

```
def areaRaster(ras):
```

```
myRaster = Raster(ras)
```

```
# DIMENSIONES DE LA CELDA
```

```
cellSizeX = myRaster.meanCellWidth
```

```
cellSizeY = myRaster.meanCellHeight
```

```
areaCell = cellSizeX * cellSizeY
```

```
# CÁLCULO DE LA SUPERFICIE TOTAL
```

```
campoR = "Count"
```

```
cursorR = arcpy.SearchCursor (myRaster)
```

```
sumCampo = 0
```

```
for fila in cursorR:
```

```
valorR = fila.getValue (campoR)
```

```
sumCampo = sumCampo + valorR
```

```
areaRas = sumCampo * areaCell
```

```
return areaRas
```

```
# CÁLCULO DEL ÁREA DE UNA CAPA DE POLÍGONOS
```

```
# Calcula la superficie total de una Feature Class de polígonos sumando la superficie de todos los polígonos que la constituyen
```

```
def areaPoligono (Pol):
```

```
campoP = "Shape_Area"
```

```
cursorP = arcpy.SearchCursor (Pol)
```

```
areaPol = 0
```

```
for fila in cursorP:
```

```
valorP = fila.getValue (campoP)
```

```
areaPol = areaPol + valorP
```

```
return areaPol
```

```
supDisp = areaRaster (inputRaster)
```

```
edificios = areaPoligono (inputPol1)
```

```

zona = areaPoligono (inputPol2)

# CÁLCULO DE LAS ESTADÍSTICAS
# % Superficie de tejados disponible / Superficie construida
Est1 = (supDisp / edificios) * 100
# % Superficie de tejados disponible / Superficie total de la zona
Est2 = (supDisp / zona) * 100

# CREAR UN ARCHIVO TXT CON LOS RESULTADOS
archivo = open (resultado,"w")
archivo.write ("SUPERFICIE\n\n")
archivo.write ("Tejados disponibles" + "%13.2f" % supDisp + " m2\n\n")
archivo.write ("Construida" + "%22.2f" % edificios + " m2\n\n")
archivo.write ("Total de la zona" + "%16.2f" % zona + " m2\n\n\n")
archivo.write ("RELACION\n\n")
archivo.write ("Superficie de tejados disponible / Superficie construida" + "%16.2f" % Est1
+ " %\n\n")
archivo.write ("Superficie de tejados disponible / Superficie total de la zona" + "%10.2f" %
Est2 + " %\n")
archivo.close ()

```

ANEXO III. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE LA POTENCIA INSTALADA

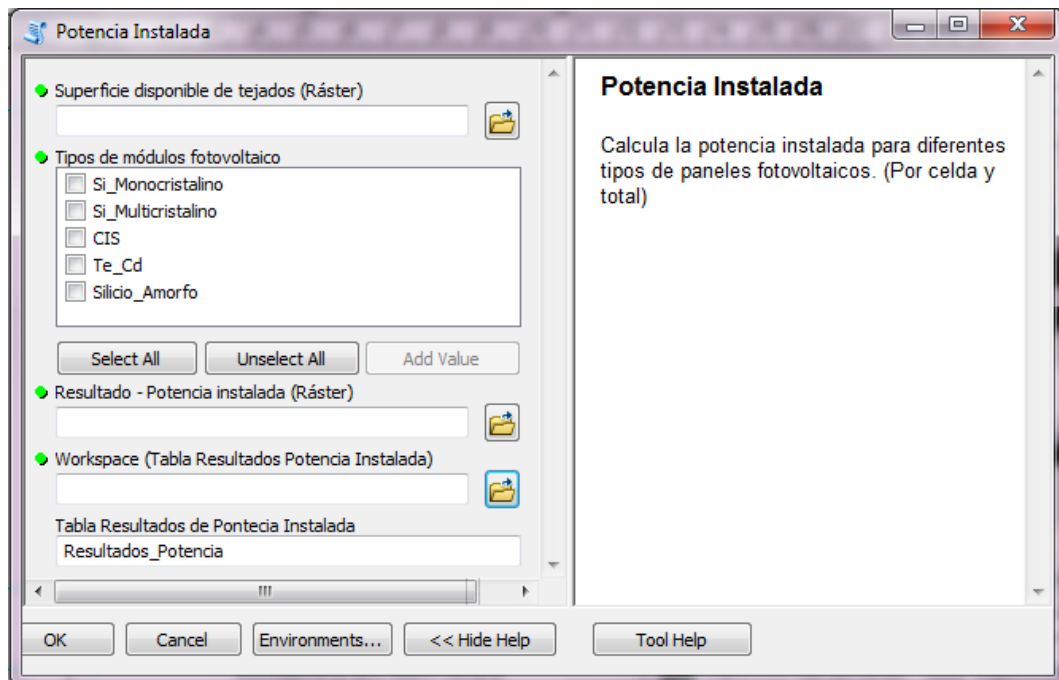


Figura 56. Ventana de la herramienta 'Potencia Instalada'.

Herramienta: POTENCIA INSTALADA

Nombre: Potencia.py

Versión: ArcGIS 10.1

Fecha: Febrero de 2014

Calcula la potencia instalada dependiendo del tipo de módulo fotovoltaico seleccionado

(Potencia por celda y total)

IMPORTAR MÓDULOS

```
import arcpy
```

```
from arcpy import env
```

```
from arcpy.sa import *
```

COMPROBACIÓN DE LAS LICENCIAS NECESARIAS

```
arcpy.CheckOutExtension ("spatial")
```

SOBREScribir ARCHIVOS PRE-EXISTENTES

```
arcpy.env.overwriteOutput = True
```

CAPAS RÁSTER DE DATOS Y RESULTADOS

```
inRasterST = arcpy.GetParameterAsText (0)
```

```
inPV = arcpy.GetParameterAsText (1)
```

```
outRaster = arcpy.GetParameterAsText (2)
```

```
env.workspace = arcpy.GetParameterAsText (3)
```



```

tabla = arcpy.GetParameterAsText (4)

# DIMENSIONES DE LAS CELDAS
def Dim (inRaster):
    myRaster = Raster (inRaster)
    cellSizeX = myRaster.meanCellWidth
    cellSizeY = myRaster.meanCellHeight
    areaCell = myRaster * (cellSizeX * cellSizeY)
    return areaCell

# CÁLCULO DE LA POTENCIA INSTALADA POR CELDA
# (P = Ig * e * Apv -> P = Potencia instalada (kWp); Ig = Irradiación global = 1 kW/m2; e =
Eficiencia de los módulos fotovoltaicos; Apv = Superficie de tejado)
def potenciaInstalada (efect,outRasterPV):
    Ig = 1
    potencia = Ig * efect * Dim (inRasterST)
    potencia.save (outRasterPV)
    return potencia

# CREA UNA TABLA CON LOS VALORES DE POTENCIA INSTALADA POR CADA TIPO DE
MÓDULO FOTOVOLTAICO
def tablaPotenciaTotal (nombre, tablaPV, potenciaMod):
    # Herramienta 'Estadísticas zonales como tabla' para la suma total de la potencia
    instalada de cada módulo
    totalMod = tablaPV + "_Total"
    arcpy.gp.ZonalStatisticsAsTable_sa (inRasterST, "Value", potenciaMod, totalMod, "DATA",
    "SUM")
    # Copia de los valores en la tabla de resultados
    cursorM = arcpy.SearchCursor (totalMod) # 1º lee el valor de la suma de la potencia
    instalada en la tabla de cada módulo
    for filaM in cursorM:
        value = filaM.getValue ("SUM")
    del cursorM
    del filaM
    cursorR = arcpy.InsertCursor (tabla) # 2º Copia el valor de potencia en la nueva tabla de
    resultados
    filaR = cursorR.newRow ()
    filaR.Tipo_Modulo = nombre
    filaR.Potencia_Instalada_kW = value
    cursorR.insertRow(filaR)
    del cursorR
    del filaR

```

```

# SELECCIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
def tipoModulos ():
    listaPV = inPV.split (";")
    for pv in listaPV:
        if pv == "Si_Monocristalino":
            monoc = 0.16
            outMono = outRaster + "_Si_Mono"
            PI = potenciaInstalada (monoc,outMono)
            tablaPotenciaTotal (pv, outMono, PI)
        elif pv == "Si_Multicristalino":
            multi = 0.15
            outMulti = outRaster + "_Si_Multi"
            PI = potenciaInstalada (multi,outMulti)
            tablaPotenciaTotal (pv, outMulti, PI)
        elif pv == "CIS":
            cis = 0.11
            outCis = outRaster + "_CIS"
            PI = potenciaInstalada (cis,outCis)
            tablaPotenciaTotal (pv, outCis, PI)
        elif pv == "Te_Cd":
            td = 0.105
            outTD = outRaster + "_TeCd"
            PI = potenciaInstalada (td,outTD)
            tablaPotenciaTotal (pv, outTD, PI)
        elif pv == "Silicio_Amorfo":
            sa = 0.06
            outSa = outRaster + "_Si_Amorfo"
            PI = potenciaInstalada (sa,outSa)
            tablaPotenciaTotal (pv, outSa, PI)

# CREA UNA TABLA QUE MOSTRARÁ LOS RESULTADOS DE POTENCIA TOTAL INSTALADA
# PARA CADA TIPO DE MÓDULO FOTOVOLTAICO
path = env.workspace
arcpy.CreateTable_management (path ,tabla)
# Campos de la tabla "Tipo_Modulo" y "Energia_kWh"
arcpy.AddField_management (tabla, "Tipo_Modulo", "TEXT", "", "", "25", "", "NULLABLE",
"NON_REQUIRED", "")
arcpy.AddField_management (tabla, "Potencia_Instalada_kW", "FLOAT", "", "2", "", "",
"NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")

tipoModulos ()

```

ANEXO IV. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE LA ENERGÍA

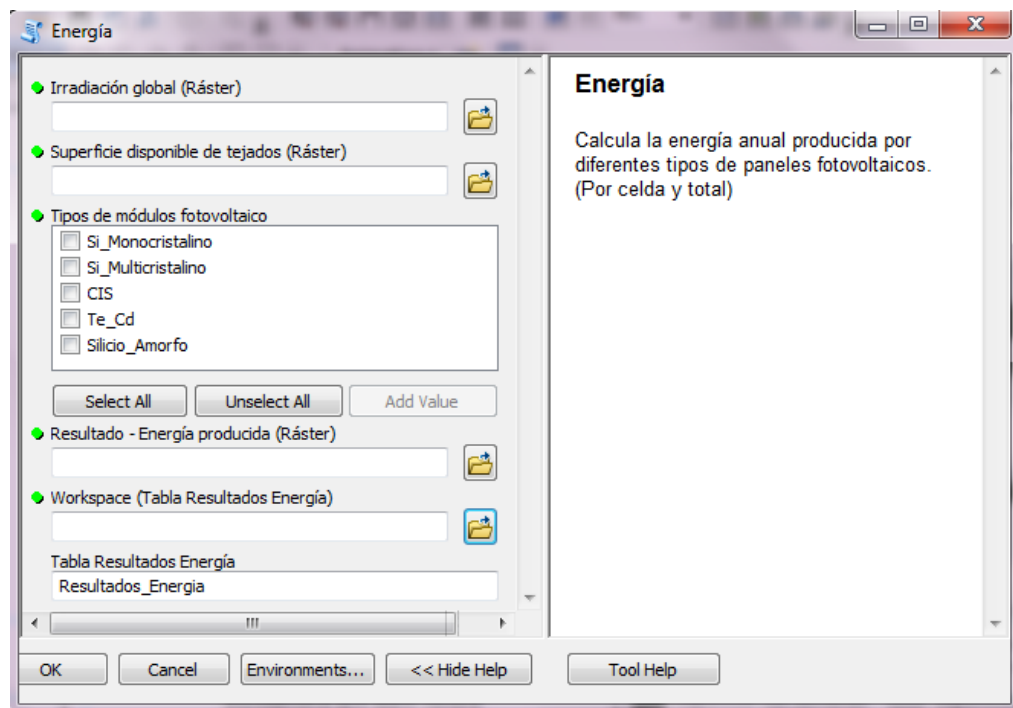


Figura 57. Ventana de la herramienta 'Energía'.

Herramienta: ENERGÍA

Nombre: Energia.py

Versión: ArcGIS 10.1

Fecha: Febrero de 2014

Calcula la energía producida dependiendo del tipo de módulo fotovoltaico seleccionado
(Energía por celda y total)

IMPORTAR MÓDULOS

```
import arcpy
```

```
from arcpy import env
```

```
from arcpy.sa import *
```

COMPROBACIÓN DE LAS LICENCIAS NECESARIAS

```
arcpy.CheckOutExtension("spatial")
```

SOBREScribir ARCHIVOS PRE-EXISTENTES

```
arcpy.env.overwriteOutput = True
```

CAPAS RÁSTER DE DATOS Y RESULTADOS

```
inRasterIS = arcpy.GetParameterAsText (0)
```

```
inRasterST = arcpy.GetParameterAsText (1)
```

```
inPV = arcpy.GetParameterAsText (2)
```

```
outRaster = arcpy.GetParameterAsText (3)
```

```

env.workspace = arcpy.GetParameterAsText (4)
tabla = arcpy.GetParameterAsText (5)

# DIMENSIONES DE LAS CELDAS
def Dim(inRaster):
    myRaster = Raster (inRaster)
    cellSizeX = myRaster.meanCellWidth
    cellSizeY = myRaster.meanCellHeight
    areaCell = myRaster * (cellSizeX * cellSizeY)
    return areaCell

# CÁLCULO DE LA ENERGÍA GENERADA POR CELDA
# (E = Ia * e * Apv * PR --> E = Energía anual (kWh); Ia = Irradiación solar global anual
(kWh/m2); e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos; Apv = Superficie de tejado; PR =
Performance Ratio = 0.8)
def energiaProducida (efect,outRasterPV):
    PR = 0.8
    energia = Raster (inRasterIS) * effect * Dim(inRasterST) * PR
    energia.save (outRasterPV)
    return energia

# CREA UNA TABLA CON LOS VALORES DE ENERGÍA TOTAL GENERADA POR CADA TIPO DE
MÓDULO FOTOVOLTAICO
def tablaEnergiaTotal (nombre, tablaPV, energiaMod):
    # Herramienta 'Estadísticas zonales como tabla' para la suma total de la energía de cada
    módulo
    totalMod = tablaPV + "_Total"
    arcpy.gp.ZonalStatisticsAsTable_sa (inRasterST, "Value", energiaMod, totalMod, "DATA",
    "SUM")
    # Copia de los valores en la tabla de resultados
    cursorM = arcpy.SearchCursor (totalMod) # 1º lee el valor de la suma de energía en la
    tabla de cada módulo
    for filaM in cursorM:
        value = filaM.getValue ("SUM")
    del cursorM
    del filaM
    cursorR = arcpy.InsertCursor (tabla) # 2º Copia el valor de energía en la nueva tabla de
    resultados
    filaR = cursorR.newRow ()
    filaR.Tipo_Modulo = nombre
    filaR.Energia_kWh = value
    cursorR.insertRow (filaR)
    del cursorR

```

del filaR

SELECCIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

```
def tipoModulos ():
```

```
    listaPV = inPV.split (";")
```

```
    for pv in listaPV:
```

```
        if pv == "Si_Monocristalino":
```

```
            monoc = 0.16
```

```
            outMono = outRaster + "_Si_Mono"
```

```
            EP = energiaProducida (monoc,outMono)
```

```
            tablaEnergiaTotal (pv, outMono, EP)
```

```
        elif pv == "Si_Multicristalino":
```

```
            multi = 0.15
```

```
            outMulti = outRaster + "_Si_Multi"
```

```
            EP = energiaProducida (multi,outMulti)
```

```
            tablaEnergiaTotal (pv, outMulti, EP)
```

```
        elif pv == "CIS":
```

```
            cis = 0.11
```

```
            outCis = outRaster + "_CIS"
```

```
            EP = energiaProducida (cis,outCis)
```

```
            tablaEnergiaTotal (pv, outCis, EP)
```

```
        elif pv == "Te_Cd":
```

```
            td = 0.105
```

```
            outTD = outRaster + "_TeCd"
```

```
            EP = energiaProducida (td,outTD)
```

```
            tablaEnergiaTotal (pv, outTD, EP)
```

```
        elif pv == "Silicio_Amorfo":
```

```
            sa = 0.06
```

```
            outSa = outRaster + "_Si_Amorfo"
```

```
            EP = energiaProducida (sa,outSa)
```

```
            tablaEnergiaTotal (pv, outSa, EP)
```

CREA UNA TABLA QUE MOSTRARÁ LOS RESULTADOS DE ENERGÍA TOTAL PARA CADA TIPO DE MÓDULO FOTOVOLTAICO

```
path = env.workspace
```

```
arcpy.CreateTable_management (path ,tabla)
```

```
# Campos de la tabla "Tipo_Modulo" y "Energia_kWh"
```

```
arcpy.AddField_management (tabla, "Tipo_Modulo", "TEXT", "", "", "25", "", "NULLABLE",  
"NON_REQUIRED", "")
```

```
arcpy.AddField_management (tabla, "Energia_kWh", "FLOAT", "", "2", "", "",  
"NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")
```

```
tipoModulos ()
```


ANEXO V. HERRAMIENTA PARA ASOCIAR LOS EDIFICIOS Y RESULTADOS

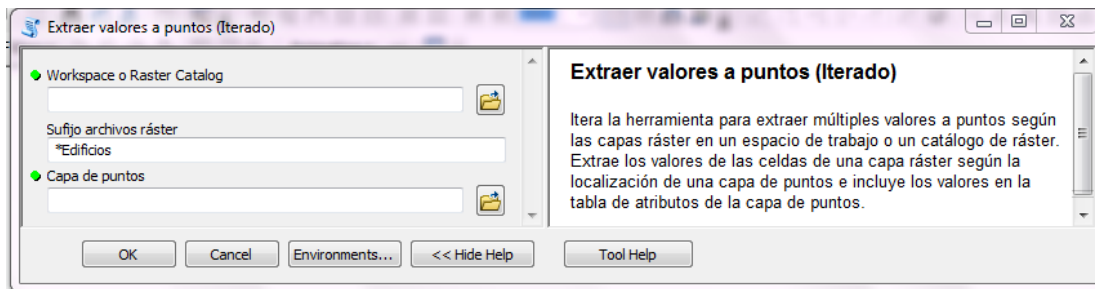


Figura 58. Ventana de la herramienta 'Extraer valores a puntos (Iterado)'.

Herramienta: EXTRAER VALORES A PUNTOS (ITERADO)

Nombre: Itera_Valor_Punto.py

Versión: ArcGIS 10.1

Fecha: Febrero de 2014

Itera la herramienta para extraer múltiples valores a puntos según las capas ráster en un espacio de trabajo.

Extrae los valores de las celdas de una capa ráster según la localización de una capa de puntos e incluye los valores en la tabla de atributos de la capa de puntos.

IMPORTAR MÓDULOS

```
import arcpy
```

```
from arcpy import env
```

```
from arcpy.sa import *
```

COMPROBACIÓN DE LAS LICENCIAS NECESARIAS

```
arcpy.CheckOutExtension ("spatial")
```

SOBREScribir ARCHIVOS PRE-EXISTENTES

```
arcpy.env.overwriteOutput = True
```

WORKSPACE, CAPAS RÁSTER DE DATOS Y RESULTADOS

```
env.workspace = arcpy.GetParameterAsText (0)
```

```
inRaster = arcpy.GetParameterAsText (1)
```

```
inPuntos = arcpy.GetParameterAsText (2)
```

ITERACIÓN Y EXTRACCIÓN DE VALORES EN LAS CAPAS RÁSTER

Iteración

```
rasterList = arcpy.ListRasters (inRaster, "All")
```

Extracción de múltiples valores a puntos

```
for i in rasterList:
```

```
arcpy.gp.ExtractMultiValuesToPoints_sa (inPuntos, i + " " + i[0: len (i)- len (inRaster)],  
"NONE")
```

ANEXO VI. SUBMODELO DEL MAPA DE SOMBRAS

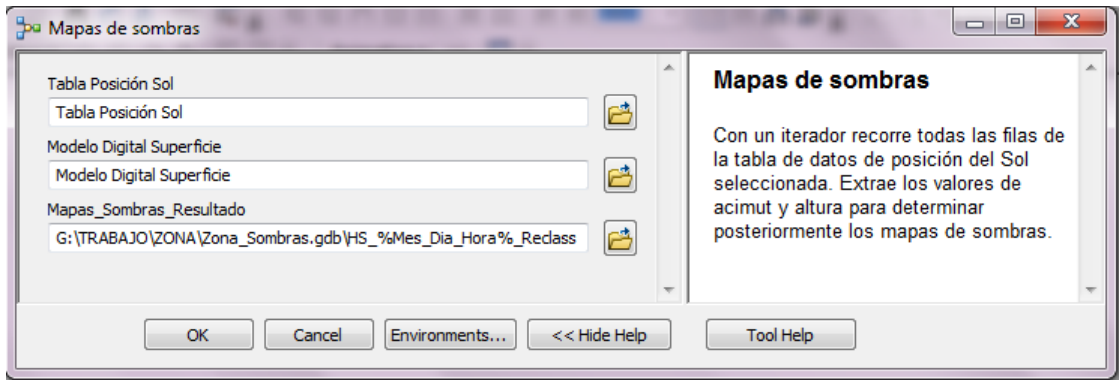


Figura 59. Ventana del submodelo ‘Mapas de sombras’.

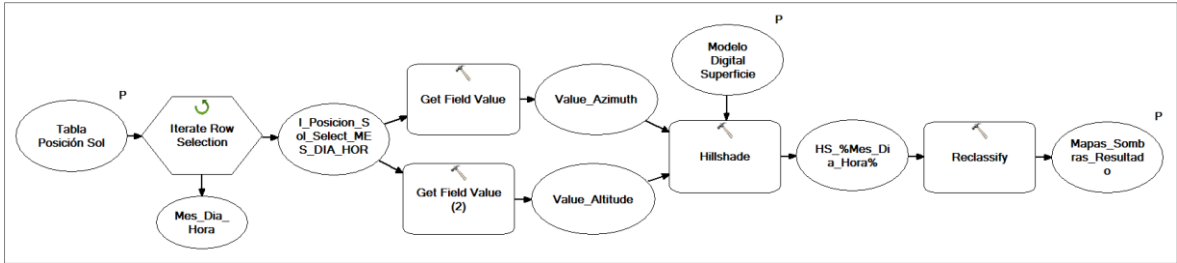


Figura 60. Submodelo para la generación de mapas sombras.

ANEXO VII. SUBMODELO DE ESTADÍSTICA DE ZONA ITERADA

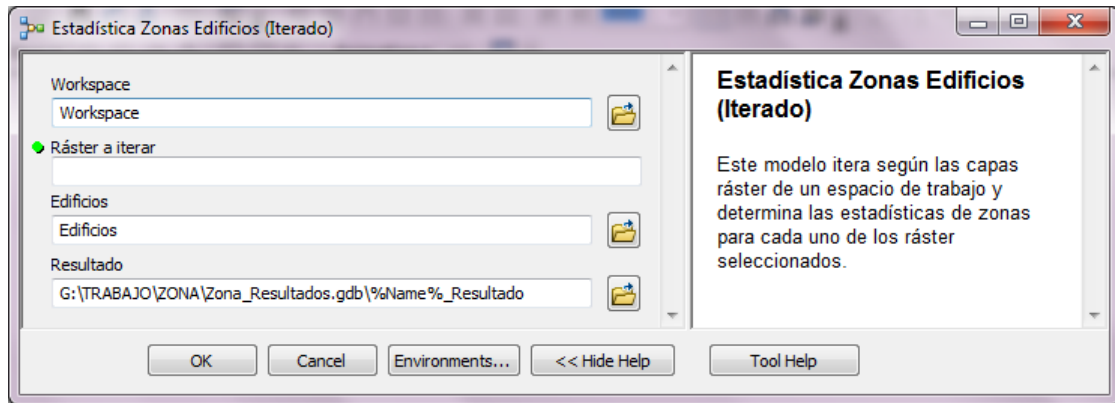


Figura 61. Ventana del submodelo 'Estadística Zonas a Tabla (Iterado)'.

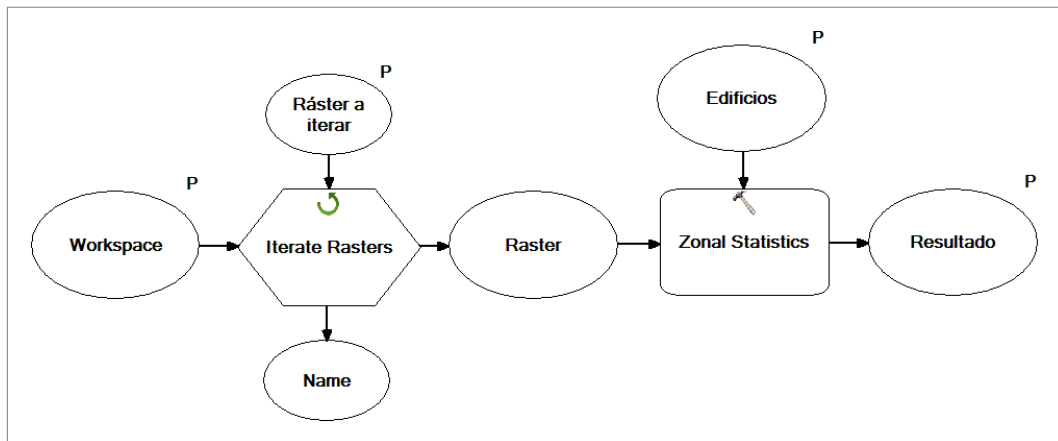


Figura 62. Submodelo para iterar la herramienta de estadística de zona.

ANEXO VIII. MODELO GENERAL

